

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Studijní program : Geologie

Studijní obor : Aplikovaná geologie



**Řízená umělá infiltrace jako nástroj pro eliminaci negativních
dopadů klimatické změny.**

**Managed artificial recharge as a tool to eliminate negative
impacts of climate change.**

Diplomová práce

Bc. Tomáš Kvašňovský

Vedoucí práce : **Doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CSc.**

PRAHA, 2019

Prohlášení :

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a veškeré informační zdroje, ze kterých jsem čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Tato diplomová práce ani její část nebyla předložena k získání jiného, nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne

.....

Tomáš Kvašňovský

Pod'akovanie :

Touto cestou by som rád pod'akoval vedúcemu mojej diplomovej práce doc. RNDr. Zbyňkovi Hrkalovi, CSc., ktorý mi poskytol odborný dohľad, cenné pripomienky, rady a v neposlednom rade aj podklady, ktoré mi dopomohli k vypracovaniu tejto práce. Veľké pod'akovanie patrí mojej rodine a blízkym, ktorí za mnou stáli po celú dobu štúdia a boli pre mňa veľkou oporou.

Abstrakt :

Téma technologii umělé dotace vody do podzemí, její přímí použití a aplikace v terénu se stává častější otázkou v zahraničí, ale i České republice. Přispívá k tomu negativní trend průběhu hladin podzemní vody v posledních letech způsobených výraznějším obdobím sucha a regresních trendů teploty. V práci jsou v teoretické části předloženy poznatky využití umělé dotace podzemní vody, a to i s konkrétními případy ve světě, nebo v ČR. Tahle práce je potom zaměřena na celkem specifický případ vybudování podzemní hráze v malé obci Meziboří v prostředí krystalinika Českého masivu. Přesněji na její efektivitu a dopad na přirozený odtok podzemní vody. K tomuto účelu byl vypracovaný numerický model v programu Groundwater Vistas (nadstavba pro MODFLOW). Z výsledků možno pozorovat míru ovlivnění režimu podzemních vod jak v stacionárním, tak i dynamickém modelu. Po nasimulování hráze v ustáleném režimu neovlivněných podmínek se zvýšila hladina podzemní vody v modelu těsně před hrází výrazně nad úroveň terénu. Možné čerpání bez vysušení kolektoru potom představuje z vrtu těsně před hrází 5,4 - 5,8 m³/den (0,063 – 0,067 l/s). V technickém návrhu předložený drenážní vývod pod povrchem byl nasimulovaný v programu 0,5 m pod terénem a průtok přes něho dosahuje hodnot od 4,16 m³/den (0,048 l/s) do 4,6 m³/den (0,053 l/s). Proto je v tomto případě vhodné uvažovat o akumulacích nádrží, které pojmu dostatečné množství nevyužité vody. Pro představu časového ovlivnění kolektoru hrází je nasimulovaná i bezsrážková situace, kdy dojde k postupnému vysoušení oblasti nad hrází. V porovnání je potom neovlivněná situace bez hráze a s hrází, a to i pro nový stavební projekt. Model je více - méně hrubě orientační nástroj pro představu, jakou efektivitu by mohla podzemní hráz v horninovém prostředí vykazovat vzhledem na finanční a časovou náročnost realizace.

Klíčová slova :

hydrogeologie, podzemní hráz, umělá infiltrace, umělá dotace, vodní bilance, numerický model

Abstract :

The topic of artificial recharge technology for water supply into the underground, its direct use and application in the field is becoming a more frequent foreign question, but also in the Czech Republic. This is due to the negative trend in groundwater levels over the past 10 years, caused by drought and temperature regression trends. The theoretical part of this thesis presents the knowledge of the use of artificial groundwater recharge, even with specific cases in the world or in the Czech Republic. This work is especially focused on a very specific case of the construction that represent underground dam in the village of Meziboří in the environment of the Czech massif “hard rocks”. Specifically, its efficiency and impact on natural groundwater runoff. For this purpose, a numerical model was developed in the program Groundwater Vistas (extension for MODFLOW). From the results we can observe the influence of natural groundwater regime in both static and dynamic model. After simulating the dam in a steady-state regime of unaffected conditions, the groundwater level in the model before the dam increased significantly above ground level. The possible pumping without drying the collector then represents values $5,4 - 5,8 \text{ m}^3/\text{day}$ ($0,063 - 0,067 \text{ l/s}$) from the well just before the dam. The drain presented in the technical project just below the surface was simulated in the program 0,5 m below the ground and the flow through it reaches values from $4,16 \text{ m}^3/\text{day}$ ($0,048 \text{ l/s}$) to $4,6 \text{ m}^3/\text{day}$ ($0,053 \text{ l/s}$). It is therefore appropriate to consider in this situation storage tanks than can accommodate a sufficient amount of unused water. For imagine the temporal influence of the aquifer by the underground dam, the situation is also simulated without precipitation, where the area above the dam is gradually dried. In comparison, the situation is unaffected without dam and with dam, even for the new technical project. The numerical model is more or less an orientation tool for an idea of the effectiveness of underground dam it could show in the rock environment with regard to financial and time demands of realization.

Key words :

hydrogeology, underground dam, artificial infiltration, artificial recharge, water balance, numerical model

Obsah :

1. Úvod.....	8
2. Cieľ diplomovej práce.....	9
3. Zaradenie témy diplomovej práce do kontextu projektu MŽP.....	9
4. Záujmové územie a prírodné pomery.....	10
4.1. Územné vymedzenie	10
4.2. Geomorfológia	11
4.3. Klimatické pomery	12
5. Geológia	13
5.1. Geológia v najbližšom okolí	13
5.2. Geológia širšej oblasti	14
5.3. Zastúpenie hornín a orogenéza.....	16
6. Hydrogeologická charakteristika a podzemné hrádze.....	18
6.1. Príklady štúdia vlastností a parametrov hydrogeologického masívu	22
6.2. Podzemné hrádze.....	26
7. Riadená, umelá dotácia podzemných vôd	28
7.1. Štúdie a príklady vo svete	31
7.2. Umelá infiltrácia v Českej republike a na Slovensku	39
8. Numerické modelovanie v hydrogeológii	43
9. Program Groundwater Vistas a metóda konečných diferencií.....	51
10. Prieskumné práce na lokalite a technický projekt.....	54
10.1. Povrchová geofyzika	54
10.2. Vrtný prieskum.....	55
10.3. Karotážne merania.....	55
10.4. Technický a stavebný projekt.....	57

11. Zhrnutie časovo - premenných dát na lokalite	60
11.1. Dáta zo 4 monitorovacích vrtov	60
11.2. Porovnanie zrážok s hladinami podzemnej vody na lokalite	60
12. Numerický model v programe Groundwater Vistas	62
12.1. 1. Varianta ohraničenia povodia.....	62
12.1.1. Vymedzenie plochy povodia	62
12.1.2. Modelová sieť, vstupné dáta a morfológia	64
12.1.3. Okrajové podmienky modelu	67
12.1.4. Kalibrácia modelu	68
12.1.5. Výsledky a výstupy modelu	74
12.2. 2. Varianta ohraničenia povodia.....	84
12.2.1. Vymedzenie plochy povodia	84
12.2.2. Modelová sieť, vstupné dáta a morfológia	85
12.2.3. Okrajové podmienky a kalibrácia modelu	86
12.2.4. Výsledky a výstupy modelu	87
12.3. Dynamický model pre 2. variantu povodia	96
12.3.1. Popis konceptu, nastavenie parametrov a okrajové podmienky.....	96
12.3.2. Výsledky a výstupy modelu	98
12.4. Model podľa najnovšieho technického projektu	101
12.4.1. Koncept a nastavenie parametrov pridaných prvkov	101
12.4.2. Stacionárny model.....	103
12.4.3. Dynamický model	105
13. Diskusia a zhrnutie výsledkov.....	108
14. Záver.....	113
15. Zoznam použitej literatúry	114
16. Prílohy	119

1. Úvod

Možnosti riadeného, umelého dopĺňania podzemných vôd (z angl. „artificial groundwater recharge“), pod ktoré spadá aj metóda umelej infiltrácie sú známe už dlhšiu dobu (v Európe už v druhej polovici 19. storočia podal základ na príklade brehovej infiltrácie Thiem, v U.S.A. nepriamo už počas 30. rokov minulého storočia, neskôr veľký záujem najmä v 70. až 80. rokoch (Asano, 1985), a na prelome tisícročia potom napr. Bouwer (1999), Bouwer (2002). Na rozdiel od prirodzenej brehovej infiltrácie, alebo infiltrácie zo zrážok je tento typ riadený, a je ho možné v čase a závislosti na aktuálnych potrebách meniť. Navyše prirodzené horninové prostredie môže pôsobiť nielen ako akumulačný priestor, ale aj ako prírodný filter a zvyšovať kvalitu vsakovaných vôd. Preto je vhodné v niektorých hydrogeologicky deficitných oblastiach, či už v našich podmienkach, alebo v zahraničí, túto metódu uvažovať minimálne na lokálne zásobovanie pitnou, alebo úžitkovou vodou. Táto práca sa zaoberá jednou z viacerých variant umelého „dobývania“ podzemných vôd v prostredí prielinovo – puklinovom až puklinovom, kde sa na množstve a plošnej variabilite odtoku podzemnej vody podieľa najmä sklon svahu, vlastnosti a priestorové usporiadanie puklín, a v neposlednom rade aj mocnosť zvetralinovej zóny. V Českej republike sa umelou infiltráciou a jej možným využitím už pomerne dlhú dobu zaoberá Výskumný ústav vodohospodársky T. G. Masaryka (Zajíček, 1970).

Vo veľa prípadoch je odber vody pre väčšie zásobovanie riešený využitím brehovej infiltrácie a čerpaním v studňových radách popri vodnom toku. Táto metóda je založená z časti na prirodzenom procese, ktorý je ale indukovaný čerpaním vody zo studní a je závislá na vodnom stave daného toku, a samozrejme na mocnosti a priestorovom uložení zvodnených vrstiev. V našom prípade predstavuje odberné a akumulačné miesto svah bez výraznejšieho kvartérneho pokryvu tvorený elúviom o rôznej mocnosti. V podloží potom kryštalinickými rozpukanými horninami s blokovým charakterom. V ňom sa kolmo na smer prúdenia vybuduje tesniaca clona so zanedbateľnou priepustnosťou, ktorá zvýši úroveň hladiny podzemnej vody pre následný riadený odber. Táto metóda sa neradí k štandardným metódam umelej infiltrácie, ale je zahrnutá do celkového pojmu „umelého využívania podzemných vôd“, ktoré sa dá zefektívniť umelou infiltráciou z povrchových nadrží, rýh, alebo hrádzí. V českých pomeroch je podobný projekt neobvyklý a neopiera sa o žiadne predchádzajúce prípady.

V takýchto miestach s pomocou využitia gravitačne riadeného pohybu podzemnej vody, kde je veľký základný špecifický odtok, alebo suchých oblastiach sa zdá byť táto metóda dobrým a vhodným riešením. Táto práca sa zameriava na efektívnosť tohto konceptu a možnú perspektívnosť do budúcnosti, aj keď je nutné podotknúť, že sa jedná o veľmi malý, a z hľadiska regionálneho izolovaný akumulčný priestor, takže špecifika pre prípadné ďalšie oblasti Českého masívu a podobný projekt treba zohľadňovať samozrejme zvlášť a individuálne.

2. Cieľ diplomovej práce

Práca sa zaoberá zhodnotením daného technologického riešenia umelého obohatenia zásob podzemnej vody na základe numerického modelu v programe Groundwater Vistas (nastavba s užívateľským rozhraním pre MODFLOW) a takisto z pohľadu dostupných terénnych dát priamo zo zadanej lokality, či už karotážnych meraní, časových radov z merania hladín zo 4 monitorovacích vrtov, zrážkových údajov, zhodnotením podložia z 10 prieskumných jadrových vrtov, povrchovej geofyziky a pod. Táto bohatá škála geologických metód bude jednak podkladom pre model, čiže pre odvodenie konkrétnych hydraulických parametrov, zrážok a pod., ako aj pre samotné zhodnotenie hydrogeologických pomerov na záujmovej lokalite. Na záver a vo výsledkoch bude diskutovaný možný, predpokladaný dopad použitej technológie na vodný režim v kolektore, a taktiež efektívnosť projektu vzhľadom na náročnosť realizácie. To môže byť užitočné pre prípadné budúce projekty v podobných podmienkach.

3. Zaradenie témy diplomovej práce do kontextu projektu MŽP

Z pôvodne 6 vybraných pilotných lokalít zahrnutých do projektu riešeného Výskumným ústavom vodohospodárskym T. G. Masaryka a 4 kooperujúcich organizácii, ktorý sa zaoberá perspektívnym využívaním rôznych typov umelej infiltrácie v ČR, vzišla ako prvá realizovaná lokalita Meziboří pri Litvínove. Tomuto kroku predchádzali záverečné správy z projektu pre problematiku sucha Ministerstva životného prostredia : „Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR“ z roku 2010 a záverečná správa „Řízená umělá infiltrace.“ z roku 2016. Prvá z nich sa venuje najmä metodikou hodnotenia územia z hľadiska vhodnosti pre umelú infiltráciu a vytipovaniu lokalít v celorepublikovom merítku, a druhá potom ich

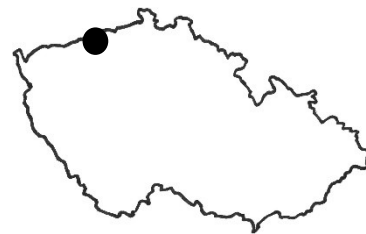
konkrétnymi prírodnými pomermi, popisom cieľov a zhodnotením povrchovej geofyziky ako prvotným terénnym prieskumom.

Cieľom samotného projektu v Meziboří je vytvoriť technologické riešenie a model pre zlepšenie vodnej bilancie menších obcí v špecifickom prostredí deficitnej oblasti kryštalinika Českého masívu spomalením prirodzeného odtoku podzemných vôd. Tým sa vytvorí vo svojej podstate zníženie miery odtoku podzemných vôd na celkovom odtoku. Toto bude dosiahnuté pomocou výstavby tesniacej clony (podpovrchovej hrádze), drenážneho systému, odberného zariadenia a prípadne vhodne umiestnených infiltračných objektov, ktoré budú umelo dotovať a ešte viac zefektívňovať celý systém. Pilotnú oblasť zahŕňa katastrálne územie Meziboří u Litvínova (693600, 567311) a má plochu cca. 10 hektárov (0,1 km²). Užívateľom výsledku je Mestský úrad v Meziboří (Hrkal, 2016).

4. Záujmové územie a prírodné pomery

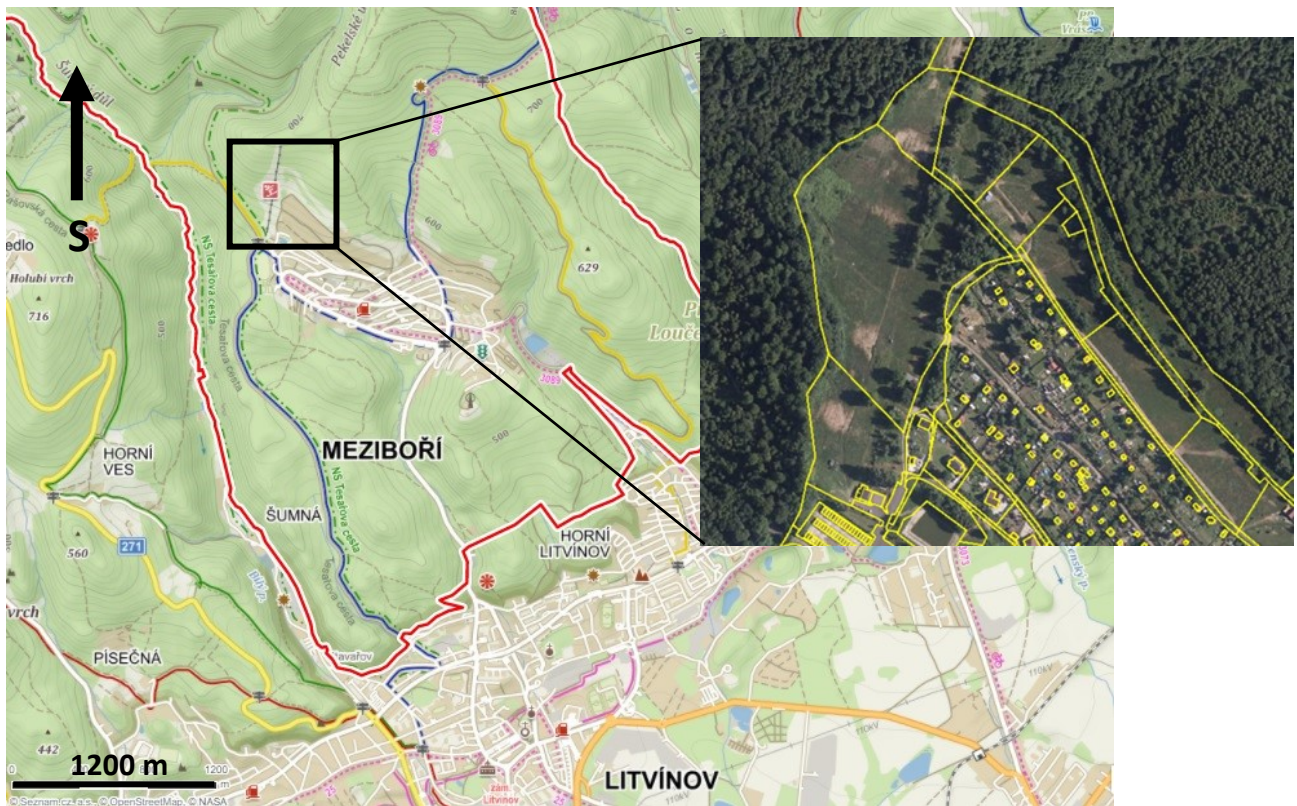
4.1. Územné vymedzenie

Lokalita leží v oblasti Krušných hôr približne 3 kilometre severne od Litvínova v menšom priľahlom meste Meziboří, ktoré spadá pod okres Most (Ústecký kraj). Mesto sa nachádza na úpätí Krušných hôr a zo severnej strany ho obklopujú dva kopce s názvom Střelná (868 m n.m.), a najvyššia hora východnej časti Krušných hôr Loučná (956 m n.m.). Je situované v údolí Divokého potoka, ktorý sa vlieva v Litvínove do Bíleho potoka. Ten tvorí na západ od mesta výrazne zarezané údolie a končí ako ľavostranný prítok Bíliny v areáli Unipetrolu južne od Litvínova. Meziboří je obklopené morfológicky členitým územím s prevažne lesnatým porastom a vedie k nemu jediná prístupová cesta spájajúca Meziboří a Litvínov. V súčasnosti má približne 4830 obyvateľov.



Konkrétna sledovaná oblasť potom predstavuje svah lyžiarskeho areálu Meziboří. Dĺžka zjazdovej trate je zhruba 537 m s prevýšením 138 m na celkovú dĺžku. Vrchol zjazdovky je v nadmorskej výške 703 m n.m. a najnižšie položené miesto potom približne 565 m n.m. Zhruba 600 metrov na západ od najvyššieho bodu lyžiarskej trate sa vlieva Pekelský potok do Bíleho potoka a okraj jeho údolia z východnej strany tvorí rozvodnicu, ktorá hraničí s povodím záujmovej oblasti, a vedie od vrchu Střelná, až po nami sledovaný svah lyžiarskej trate.

Táto hranica je taktiež hranicou ochranného pásma 2. stupňa povrchového vodného zdroja „Bílý potok a Pekelský potok“.



Obr. 1.: Umiestnenie sledovanej záujmovej lokality obce Meziboří u Litvínova s bližším pohľadom z ortofotomapy na lyžiarsky svah. (server Mapy.cz, 2018; ČÚZK, 2018; upravené)

4.2. Geomorfológia

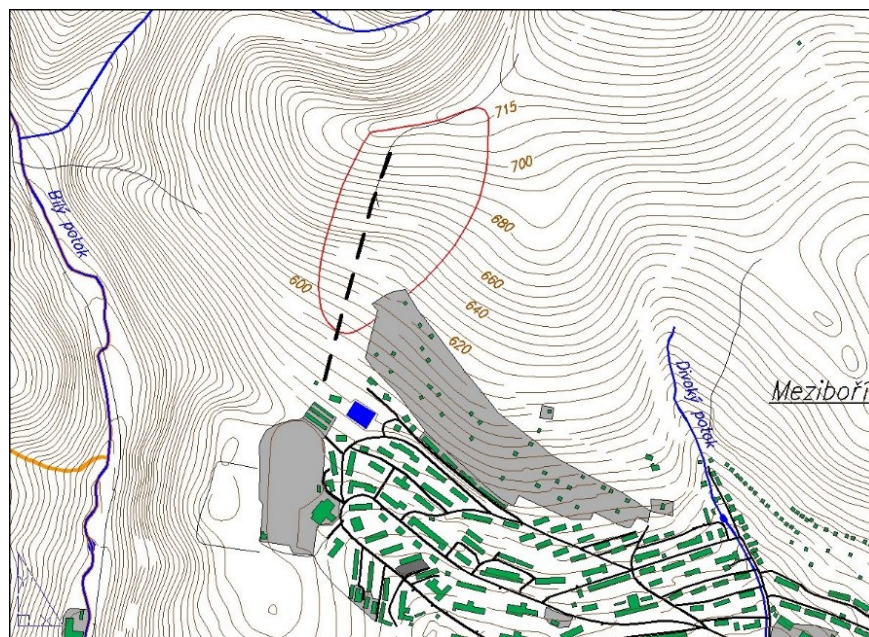
V širšom okolí predstavuje morfológicky lokalita pomerne hornatú oblasť s výrazne zarezanými údoliami potokov. Geomorfologicky spadá pod Loučenskú hornatinu, jeden z dvoch celkov krušnohorskej sústavy spolu s Klínoveckou hornatinou. Loučenská hornatina sa delí ďalej na 6 okrskov, z ktorých Meziboří pripadá Flájskej hornatine. Vo väčšom merítke možno generalizovať morfológiu ako postupné svažovanie terénu smerom od severozápadu k juhovýchodu (od štátnych hraníc k Litvínovu (330 m n.m.)), kde je kryštalinikum prerušené tektonicky krušnohorským zlomom. Ďalej už pokračuje pomerne rovinný terén terciérnych usadenín, prerazených na mnohých miestach terciérnymi vulkanitmi. Samotný svah lyžiarskeho strediska je uklonený smerom k zastavanej časti obce v sklone cca. 20% (viď. Obr. 2.).

4.3. Klimatické pomery

Najbližšia meteorologická stanica ČHMÚ sa nachádza v obci Klíny zhruba 2,5 km severozápadne od zjazdovky v nadmorskej výške 807 m n.m. Preto úhrny zrážok porovnávané z tejto stanice nemožno brať ako úplne reprezentatívne. Priemerná ročná výška zrážok sa pohybuje medzi 700 a 800 mm/rok, pričom maximálne mesačné hodnoty (90-100 mm) možno predpokladať v mesiacoch júl – august. Najnižšie potom v zimných mesiacoch, po ktorých je však pravdepodobné dlhšie udržanie snehovej pokrývky vďaka nadmorskej výške. Priemerná ročná teplota je medzi 6° až 7° C (Hrkal, 2016).

Autor v správe ešte dodáva, že v prostredí Krušných hôr nie sú zvodne zďaleka tak dôležitým „dodávateľom“ vody pre ľudskú spotrebu ako povrchové nádrže a toky. Mesto Meziboří je kompletne zásobované vodou z vodárenskej nádrže Fláje na Flájskom potoku upravenej v miestnej úpravni. Celkovo je v Mosteckom okrese iba 2,5 % obyvateľstva kompletne zásobených vodou z vlastného zdroja, či už studní, alebo vrtov. 97,5 % je teda napojených na vodovodnú sieť.

Hydrologicky spadá oblasť do povodia Ohře s rozlohou 457,356 km², ktoré patrí do väčšieho hlavného povodia Labe. Číslo rajónu : 6131, názov rajónu : „Krystalinikum krušných hor od Chomutovky po Moldavu“.

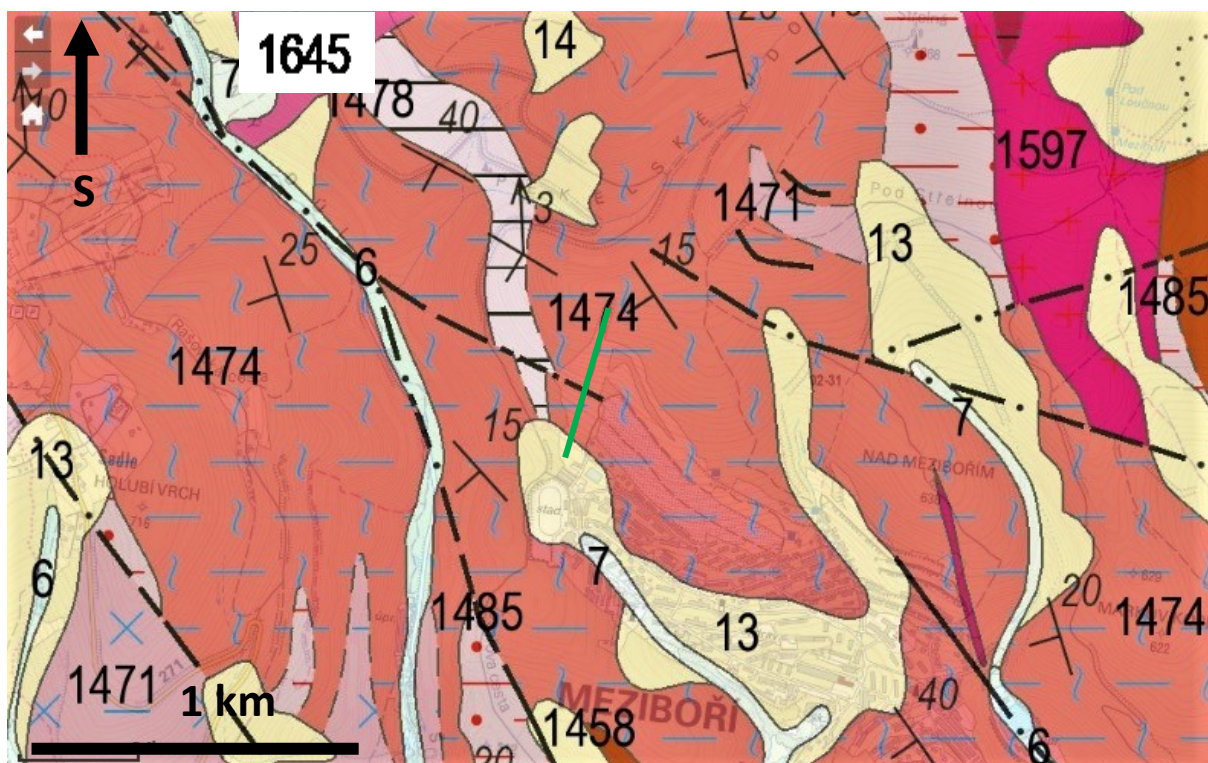


Obr. 2.: Topografická mapa s povodím k uzáverovému profilu, ktorú predstavuje plánovaná podzemná hrádza. Plocha tohto povodia je približne 11,2 ha (0,112 km²), priemerný sklon povrchu je cca. 20 % (11,4°). (Aquatest a.s., 2010)

5.) Geológia

5.1. Geológia v najbližšom okolí

Geologicky spadá územie pod krušnohorsko - smrčinske kryštalinikum, ktoré patrí pod sasko - durynskú oblasť, zaujímajúcu severozápadnú časť Českého masívu. Zjazdová trať a jej najbližšie okolie je podľa základnej geologickej mapy Českej republiky v merítku 1 : 50 000 tvorené metamorfovanými horninami spodného paleozoika. Konkrétne sa jedná v prevážnom zastúpení o ortoruly, a v užšom okolí potom aj s výskytom metagranitov a metagranodioritov. Základná geologická mapa sledovanej oblasti poukazuje aj na predpokladaný zlom, ktorý pretína spodnú časť zjazdovky lyžiarskeho areálu. Väčšie zlomové pásmo predstavuje skupinu krušnohorských zlomov, ktoré tvoria hranicu medzi krušnohorským kryštalinikom a mosteckou panvou (viď. Obr. 4. a 5.) pozri odstavce 5.2.



Obr. 3.: Geologická mapa záujmovej oblasti s vyznačenou zjazdovkou lyžiarskeho areálu - zelená čiara, legenda v Prílohe 1. (Mapový portál ČGS, 2019; upravené)

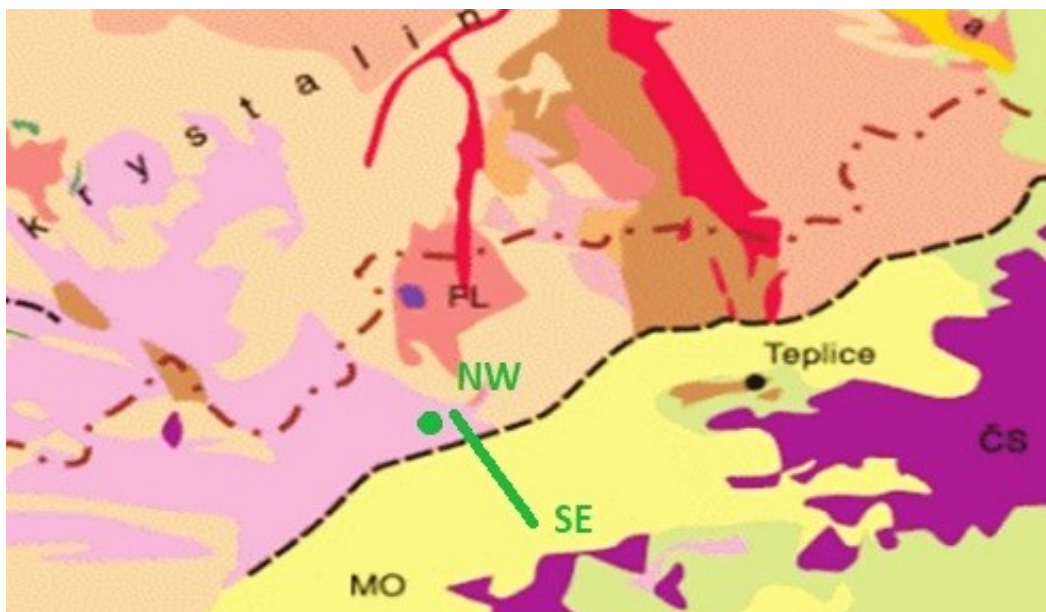
5.2. Geológia širšej oblasti

Kryštalinikum Českého masívu predstavuje najväčší fragment varijského (hercynského) orogénu v strednej Európe (Mísař et al., 1983). Na jeho súčasnú stavbu mali rozhodujúci vplyv dva orogénne cykly : kadomský a varijský (bližšie v odstavci 5.3.). Samotné kryštalinikum je rozdelené na základe tektoniky a stratigrafie do menších zón (moldanubikum, tepelsko – barrandienskú oblasť, sasko – durynskú oblasť, západočeskú (lužickú) a moravskoslezskú oblasť). Sledované územie spadá do zóny sasko – durynskej (saxothuringikum). Na území Českej republiky je tvorené metamorfovanými sedimentami, ale aj vulkanitmi, a rozsiahlymi varijskými plutónmi. Na juhovýchode susedí s tepelsko - barrandienskou oblasťou a je obmedzená litoměřickým zlomom. Na severovýchode ho oddeľuje od lužickej oblasti stredosaské nasunutie – ináč aj labský lineament (Škvor, 1975).

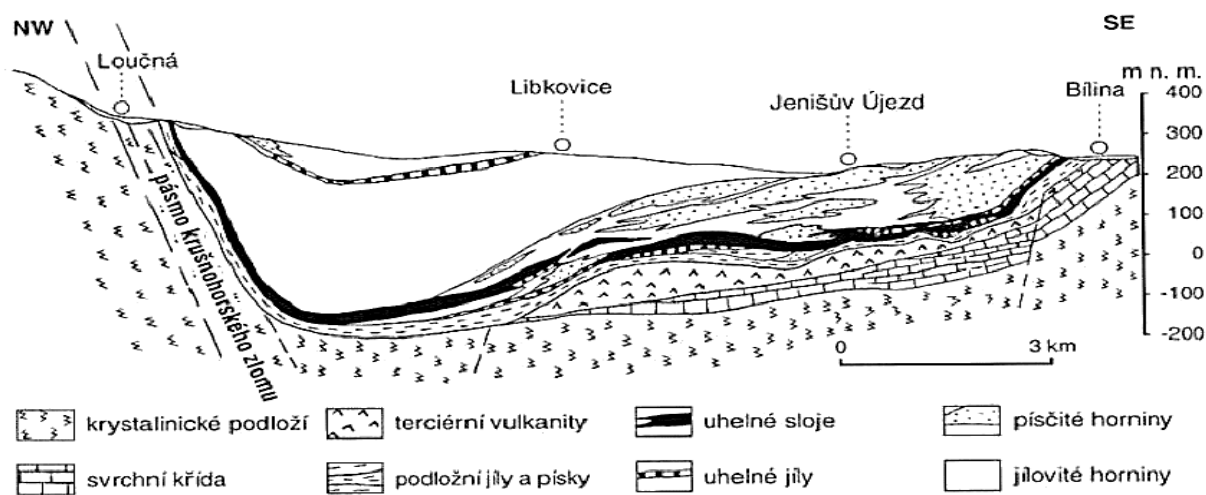
Pre vývoj celej krušnohorskej oblasti saxothuringika je dôležité jej tektonické porušenie. Na území ČR zasahuje sasko – durynská oblasť iba svojou juhovýchodnou okrajovou časťou. Patrí do nej krušnohorské kryštalinikum, krušnohorský plutón, durynsko - voglandské paleozoikum (metamorfované) a výskyty kryštalinických hornín oherského riftu (Chlupáč et al., 2002).

Smerom na východ je kryštalinikum od terciérnych panvových uloženín oddelené krušnohorským zlomovým pásmom, ktorý má prevládajúci smer JZ-SV a prebieha v celkovej dĺžke cca. 130 km. Vede cez mesto Litvínov a tvorí severnú hranicu mosteckej panvy, ktorá má mocnosť až do 500 m. Výška skoku môže dosahovať v najkontrastnejších miestach až 800 m. Na južnej časti je krušnohorské kryštalinikum a celkovo sasko – durynská oblasť ohraničená litoměřickým hlbinným zlomom (smer ZJZ-VSV), ktorý reprezentuje tzv. tepelskú suturu (šev po uzavretí sasko - durynského oceánu v devóne).

Krušnohorská oblasť kryštalinika sa ináč nazýva aj krušnohorské, resp. krušnohorsko - smrčínske antiklinórium vzhľadom na jeho charakter štruktúrnej klenby, ktoré potom ďalej prechádza za hranicami s Nemeckom do durynského synklinória. Pozdĺžna osa antiklinória prechádza v smere SSV - JJZ a norí sa k juhozápadu (Chlupáč et al., 2002).



Obr. 4.: Geológia v širšom merítke s vyznačeným rezom (Obr. 5.) a pozíciou záujmového územia (zelený bod) : MO - Mostecká panva, ČS – vulkanity Českého Stredohoria, FL - Flájsky masív. (podľa Kachlíka, 2003; upravené)



Obr. 5.: Schematický rez znázorňujúci hranicu medzi mosteckou panvou a krušnohorským antiklinóriom. (Chlupáč et al., 2002)

5.3. Zastúpenie hornín a orogenéza

Podložie širšieho záujmového územia predstavuje skupinu pestrých hornín, ktoré prešli magmatickými, metamorfnými aj deformačnými dejmi výraznej kadómskej orogenézy (750 - 530 miliónov rokov), tak aj varijskej orogenézy (cca. 390 - 310 miliónov rokov). Kryštalinikum je potom doplnené o výskyty (v oblasti medzi Litvínovom a Krupkou) drobných plutonických a vulkanických telies varijskeho veku. Z hľadiska horninového zastúpenia je tvorené prevažne metamorfovanými horninami ako sú fylity, svory, ruly, migmatity, ortoruly, bridlice a metamorfované vyvreté horniny s bazickým zložením (napr. eklogit).

Intenzita metamorfózy a deformácie klesá smerom k severozápadu, to znamená smerom od krušohorského zlomového pásma do oblasti durynského paraautochtonu na území Nemeckej republiky (Škvor, 1975).

Presný vznik súčasnej podoby sasko - durynskej oblasti je však stále predmetom dohadov a možno usudzovať podľa Vrány et al. (1997), že výsledok klenutých štruktúr je podmienený ďalekosiahlejšími presunmi kier moldanubika, spolu s tepelsko - barrandienskou oblasťou severozápadným smerom. Podľa najrelevantnejších názorov horniny prešli niekoľkými fázami deformácii, pričom najrazantnejšie pripadali na obdobie spodného karbónu (340 miliónov rokov). Následné procesy spojené s extenziou potom prišli vo vrchnom karbone až perme (Chlupáč et al., 2002).

V Krušných horách sú teda silno aj slabšie metamorfované horniny, ktoré sú podľa predpokladov proterozoické až kambrickoordovické, a sú súčasťou antiklinálnych a synklinálnych štruktúr zasahujúcich z nemeckého územia. Do týchto premenených hornín vnikajú varijske intrúzie (granitoidy), ktoré prispievajú kontaktnou metamorfózou a ich vek siaha podľa radiometrických meraní do vrchného karbónu až permu. Varijské granulitoidy sú zastúpené najmä karlovarským plutónom, ktorý pozostáva z dvoch radov intrúzií (staršej - horský granit, a mladšej – krušohorské granity) (Chlupáč et al., 2002). V skupine horského granitu sú zastúpené najmä stredne zrnité muskoviticko - biotitické a porfyrické granodiority.

Krušohorské granity (krušohorský plutón) zastupujú naružovelé muskovit - biotitické žuly, ktoré sú druhotne postihnuté hydrotermálnymi a pneumatolitickými premenami. Na základe rozmiestnenia ložísk cínu, rubídia a pod. (napr. ložisko Cínovec na styku s teplickým porfyrom) možno predpokladať, že pod povrchom majú granity krušohorského typu značne väčšie rozšírenie ako sa zdá na prvý pohľad podľa povrchových výskytov (Chlupáč et al., 2002).

V blízkosti záujmového územia potom siahajú výbežky flájskeho žulového masívu (viď. Obr. 4.), ktorý je prerazený žilou žulového porfyru, využívajúcu zjavne tektonickú predispozíciu (loučensko – flájska žila) (Hrkal et al., 2016). Flájsky masív je spolu s ďalšími menšími výskytmi plutonických hornín súčasťou krušnohorského plutónu.

Ukážka horniny zastúpenej na lokalite : Jadrový vrt J8

Hĺbka : 15 m

Hladina podzemnej vody - 18.9.2018 : 6,1 m pod terénom

Súradnice JTSK – X : 792702.3894, Y : 975240.0672, Z : 597.7439

Vrtný profil :

- 0,0 - 0,4 m tmavohnedá, humózna hlina s korenkami vegetácie
- 0,4 - 1,3 m žltohnedé, piesčité až piesčitoílovité elúvium ortoruly s drobnými úlomkami materskej horniny veľkosti do 2 cm
- 1,3 - 3,2 m kusy sľudnatej ortoruly rôzneho stupňa navetrania veľkosti od 4 cm do 8 cm
- 3,2 - 9,5 m svetlošedá, pevná, kompaktná silno sľudnatá ortorula s puklinami po cca. 30 cm
- 9,5 - 10,0 m drtené polohy hnedej, silno sľudnatej ortoruly s uklonenými železitými polohami, pukliny v rozsahu 20 cm
- 10,0-15,0 m svetlošedá, pevná, kompaktná, silno sľudnatá ortorula s puklinami po cca. 30 cm



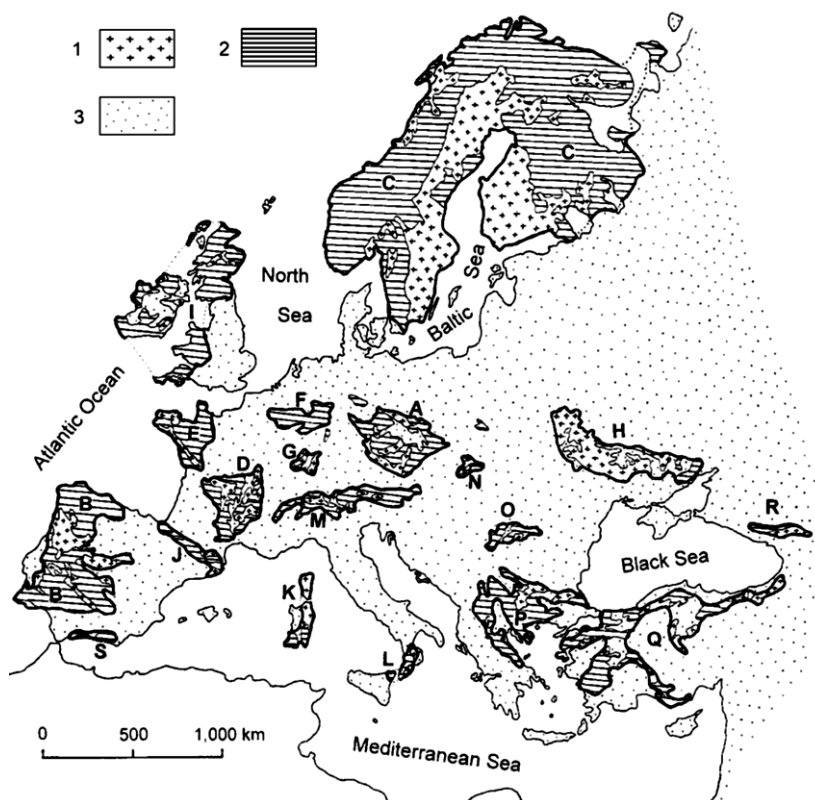
Obr. 6.: Ukážka vrtného jadra IG vrtu (J8) priamo na lokalite. (foto a popis : Zbyněk Hrkal, 2018)

6.) Hydrogeologická charakteristika a podzemné hrádze

V hydrogeologickom ponímaní spadajú horniny kryštalinika pod skupinu hornín nazývaných z angl. „hard rocks“, ktoré predstavujú tvrdé, súdržné horniny, s výraznejším prúdením podzemnej vody najmä v pripovrchovej rozpukanej zóne.

V literatúre sa ale často stretávame s nejednoznačným vymedzením tejto skupiny hornín. V užšom slova zmysle predstavujú kryštalinické horniny, to znamená vyvreté a metamorfované (Krásný et al., 2012). Iní autori poukazujú na zaradenie týchto hornín v širšom význame, najmä z hľadiska hydrogeologického sa potom jedná o vyvreté, metamorfované, nevulkanické a nekarbonátové horniny, ale aj iné výrazne cementované (kulmské) vykazujúce prakticky rovnaký charakter (Larsson et al., 1987).

Podľa Gustafssona (1993) zas termín „hard rocks“ predstavuje všetky horniny so zanedbateľnou primárnou porozitou a hydraulickou vodivosťou pre prijateľné čerpanie podzemných vôd. V našich podmienkach by mal mať tento termín širší význam. Spadajú tak pod neho aj silno cementované a zvrásnené horniny (Krásný et al., 2012).



Obr. 7.: Rozloženie hornín hydrogeologického masívu (tzv. „hard rocks“) v Európe. (číslo 2 v legende), 1. - magmatické horniny, 3. – karbonátové horniny, flyš, sedimentárne panvy a iné. (Krásný, 1996a)

Hydrogeologicky masív, pojem, ktorým sa súhrne tieto horniny („hard rocks“) u nás nazývajú, zaberá na povrchu Českej republiky plochu zhruba 45 000 km², to je asi 57 % celkového územia Českej republiky (obrázok v Prílohe 2.). Podzemná voda v kolektoroch hydrogeologického masívu v ČR dosahuje hĺbok maximálne do niekoľkých desiatok metrov a jej najväčšie prírodné zdroje v tomto prostredí sa vyskytujú v horských oblastiach najmä vďaka výdatným zrážkam a nízkej evapotranspirácii (Obr. 8.). Transmisivita u kryštalinických hornín na území Českej Republiky je nízka, až veľmi nízka, s veľkou variabilitou transmisivity, ktorá určuje mieru hydraulickej heterogenity daného prostredia (Krásný et al., 2012).

Vo svete sa nachádza na každom kontinente a buduje najmä kontinentálne štíty a jadrá. Preto najväčšiu plochu zaberá hlavne v Severnej a Južnej Amerike, Afrike, Indii a Austrálii. Pod povrchom je potom rozšírenie značne vyššie, keďže tento typ hornín tvorí podklad väčšiny sedimentárnych panvových štruktúr (Krásny, Sharp, 2007).

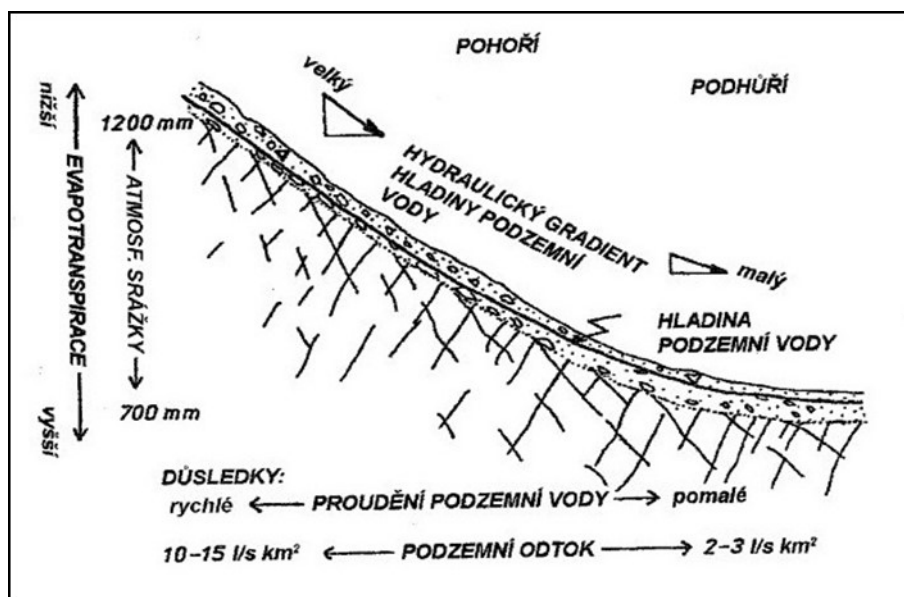
Prostredie „hard rock“ (hydrogeologicky masív) má podľa Krásneho (1996a) 3 základne vlastnosti:

- 1.) Bez výskytu hornín s prielinovou priepustnosťou. – S výnimkou najvrchnejšej zóny zvetralín, alebo kvartérnych uloženín, svahovín a pod.
- 2.) Bez výskytu vrstevných kolektorov. – S výnimkou málo rozsiahlych šošovkovitých útvarov kryštalických vápencov.
- 3.) Typické je vertikálne členenie (3 zóny). – Na rozdiel od hydrogeologickej panvy tu litológia nehrá veľkú úlohu - rôzne horniny môžu mať podobnú priepustnosť.

Priepustnosť potom generálne klesá s hĺbkou.

3 zóny vo vertikálnom smere:

- a) Zóna zvetralín (vrchná) : rozvoľnené úlomky hornín, elúvium a kvartérne uloženiny obvykle mocné iba do prvých metrov, maximálne desiatky metrov. V literatúre (Taylor, Howard, 2000; Maréchal, 2003) sa táto zóna označuje aj ako zóna regolitu, ktorý predstavuje zbytkový, nesúdržný horninový materiál, z pôvodnej materskej horniny. V tejto zóne prevažuje prielinová porozita nad puklinovou, a vo väčšine prípadov sa nachádza nad hladinou podzemnej vody (Krásný, Sharp, 2007)
- b) Zóna pripovrchového rozpukania (stredná) : puklinová porozita prevláda nad prielinovou, v regionálnom merítke predstavuje pravidelnú puklinovú sieť. Pre režim podzemných vôd zásadná aj v prípade Meziboří. Mocnosť až desiatky metrov.
- c) Zóna masívnej horniny (spodná) : Hlboko zasahujúce, vo veľa prípadoch slepo vyznievajúce zlomy. Avšak v niektorých prípadoch môžu byť aj tieto pukliny prepojené a dochádza tak k prúdeniu v regionálnom merítke. Hlboký obeh potom môže napríklad predstavovať predispozíciu na vytvorenie termálnych vôd.

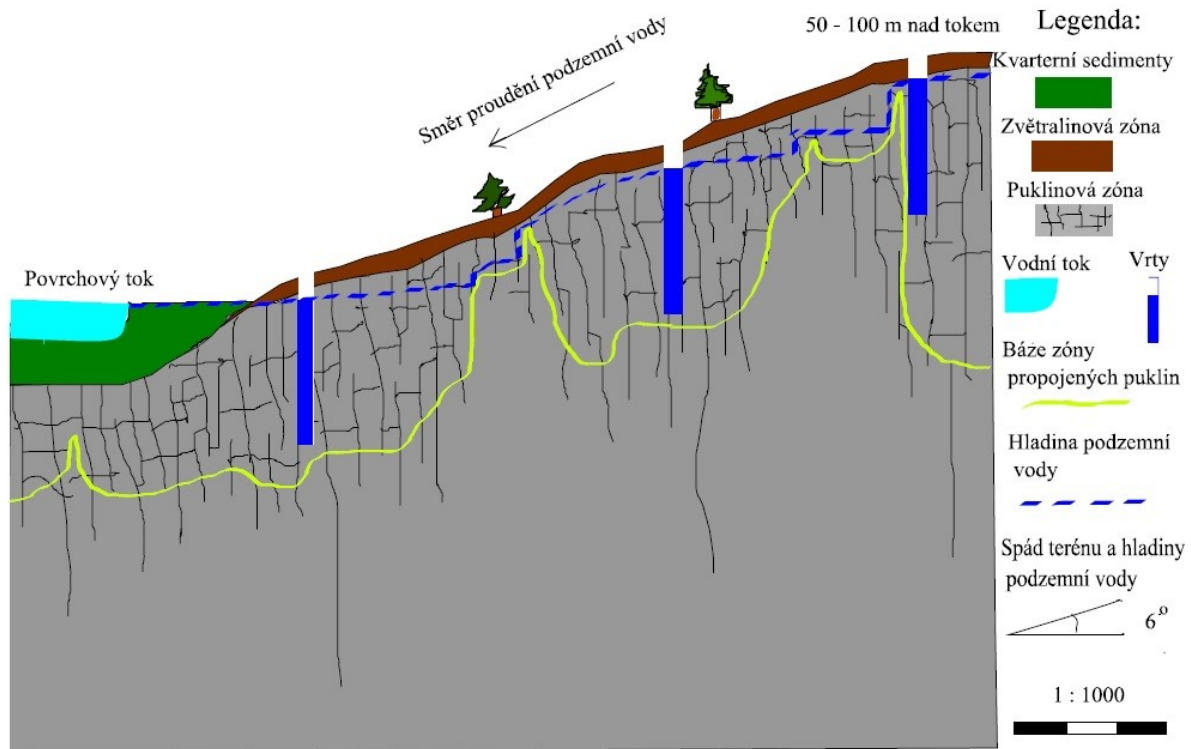


Obr. 8.: Schéma tvorby prírodných zdrojov podzemnej vody v pripovrchovom kolektore hydrogeologického masívu v klimatických podmienkach mierneho pásma. (Krásný, 1996a)

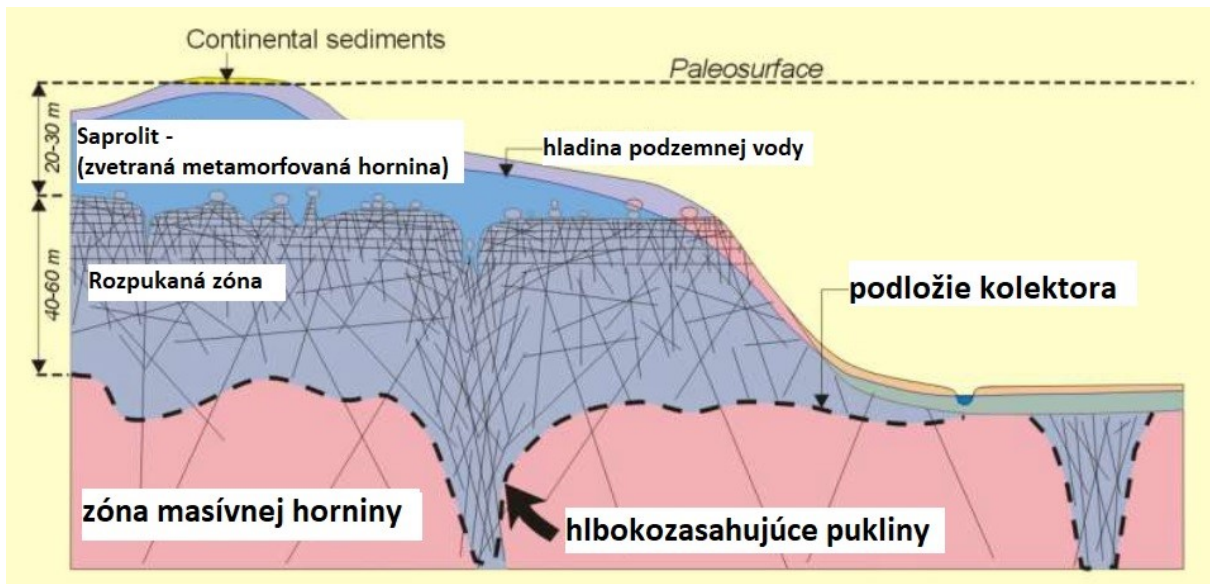
Generálne základný špecifický odtok v hydrogeologickom masíve takmer nezávisí na petrografii hornín a je funkciou zrážok a evapotranspirácie = silno vzrastá s nadmorskou výškou.

Základná hydrogeologická mapa dostupná online (ČGS) potom uvádza popis záujmového územia ako : puklinový kolektor pripovrchovej zóny rozpojených a rozpukaných hornín : dvojsľúďne ortoruly a pararuly (g), rôznych typov granitového porfyru a granitoidov (γ). Uvádza taktiež transmisivitu v rozsahu od $1,4 \cdot 10^{-5}$ až $2,9 \cdot 10^{-4}$ m²/s, teda nízka transmisivita s vysokou variabilitou.

V bližšej oblasti je podľa Hrkala (2010) hydrogeologicky dôležitá vrstva piesčitých hĺn, ktoré susedia s pripovrchovým pásmom zvetralín a rozpojených ortorúl. Hladina podzemnej vody v okolí taktiež súvisí podľa mnohých archívnych vrtov s úrovňou terénu a je relatívne plytká (1,2 m – 2 m). Taktiež v správe dodáva, že zo žiadneho z archívnych vrtov nebola odobraná voda pre fyzikálnochemický rozbor, a je tak na súčasných monitorovacích vrtoch, aby sa doplnili poznatky aj v tomto smere. Pre zaujímavosť je v Prílohe „3a“ a „3b“ uvedená tabuľka s mapou archívnych chemických rozborov z povrchových tokov.



Obr. 9.: Konceptuálny model, ktorý predstavuje rez a znázornenie hydrogeologických pomerov strmého svahu hydrogeologického masívu pri rieke Svitava. (Vacková, 2014)

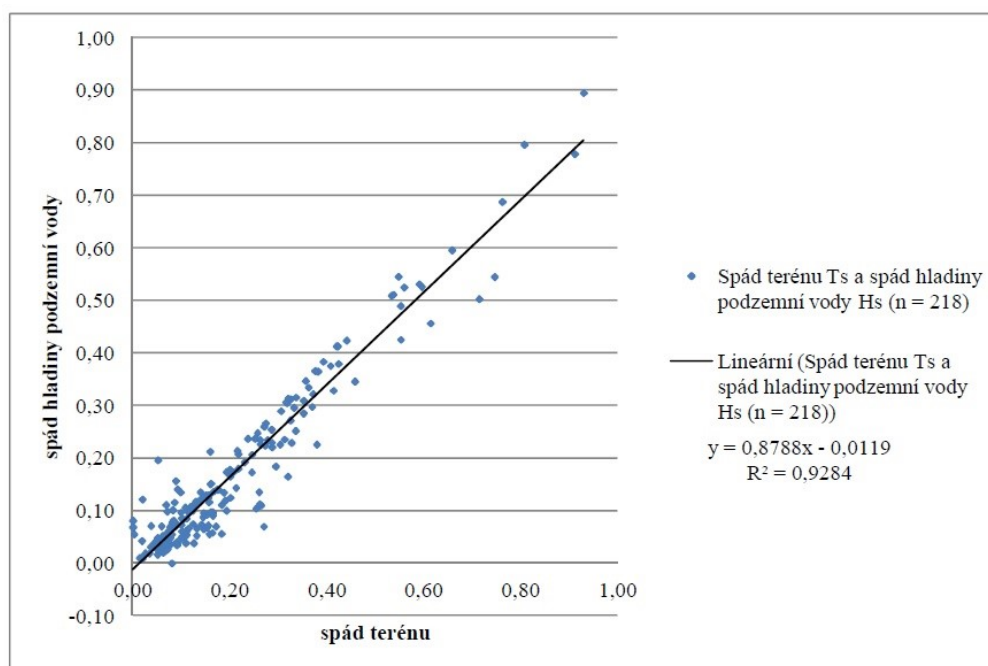


Obr. 10.: Profil kolektoru v prostredí hydrogeologického masívu. (podľa Wyna et al., 1999 v Dewandel et al., 2006; upravené)

V našom prípade možno predpokladať horizontálne prúdenie podzemnej vody len plytko pod povrchom v oblasti silno rozvetraných hornín, a v strednej, rozpukanej zóne, kde je väčšia pravdepodobnosť laterálneho prepojenia puklín. Do väčších hĺbok zasahujú zrejme dobre priepustné subvertikálne pukliny a zlomy, ktoré ale pravdepodobne nie sú vo väčších hĺbkach horizontálne prepojené do väčších celkov, teda sú bez predpokladu prúdenia podzemnej vody v regionálnom merítku.

6.1. Príklady štúdia vlastností a parametrov hydrogeologického masívu

Štúdiom charakteristiky priebehu podzemnej vody v kryštalinických horninách v okolí rieky Svitavy, a jej vzájomným vzťahom k rôznym parametrom ako sklon svahu, nadmorská výška, transmisivita a podobne sa zaoberala vo svojej diplomovej práci Vacková (2014).



Graf 1.: Graf závislosti spádu hladiny na spáde terénu v prostredí kryštalinických hornín povodia Svitavy (0,1 v grafe = spádu 10 % = 6°). (Vacková, 2014)

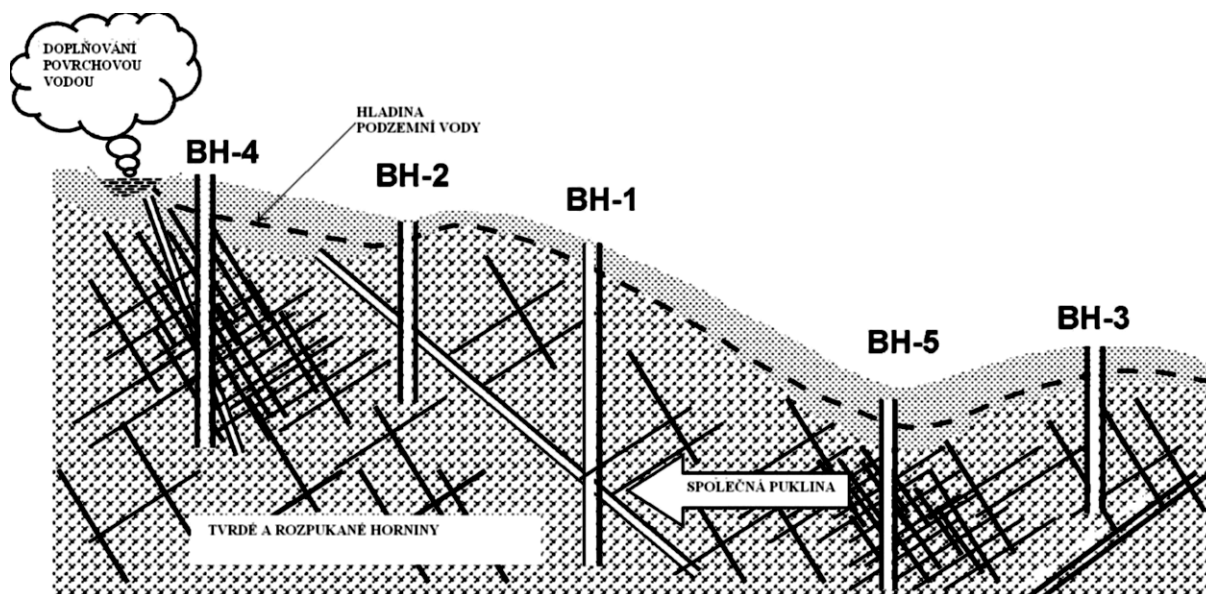
Z výsledkov vyplýva, že v tejto oblasti existuje tesná závislosť medzi spádom terénu a spádom hladiny (korelačný koeficient $r_{xy} = 0,96$). Stredný spád hladiny podzemnej vody je približne 10 % (6°) a dosahuje v priemere zhruba 88 % spádu terénu.

V práci ďalej poukazuje napríklad aj na rovnaké stredné hodnoty špecifickej výdatnosti a transmisivity v oblastiach infiltrácie aj drenáže, čo je v rozpore s obecným predpokladom hydrogeologického masívu (Krásný et. al., 2012), kedy oblasť drenáže má vo väčšine prípadov vyššiu transmisivitu ako vzdialenejšie oblasti infiltrácie. Prostredie hydrogeologického masívu je celkovo v posledných desaťročiach predmetom intenzívnejšieho výskumu, a je diskutované aj ako možné úložisko radioaktívneho odpadu (Krásný et. al., 2012).

Tektonicky je toto prostredie generálne heterogénnym a anizotropným komplexom tvoreným vo vrchnej časti rozpukanými horninami, zvetralinovou zónou pokrytým prípadným mladšími panvovými horninami a kvartérnym pokryvom. V tomto prostredí sú cesty prúdenia podzemných vôd aj v menšom merítku nepravidelne rozdelené. Preto je dôležité pre prípadné využívanie (čerpanie) podzemných vôd v takomto prostredí preskúmať a charakterizovať tektonické línie, a zhodnotiť v nich potenciál prúdenia podzemnej vody (Krásný, Sharp, 2007).

Vlastnosti tektonických línii sa z pohľadu hydrogeológie líšia, a sú ovplyvnené viacerými v nich obsiahnutými prvkami, ako podrtené pásma, intrúzie magmatických hornín, hydrotermálne vyplňanie puklín a pod. (Chandra et al., 2010). Pukliny sú najdôležitejším prvkom v tomto komplexnom systéme a na prúdenie podzemnej vody majú zásadný vplyv ich priestorová orientácia, hustota, dĺžka, výplň, miera ich rozpojenia a vzájomného prepojenia (Krásny, Sharp, 2007).

Sukhija et al. (2006) sa zaoberal procesom dopĺňania podzemných vôd v prostredí hydrogeologického masívu na základe sledovania koncentrácií chloridov a izotopovej analýzy $\delta^{18}\text{O}$. Na základe nich vytvoril konceptuálny model. Pre lepšie pochopenie obehu podzemnej vody v tomto prostredí sa zaujímal aj o vek vody, ktorý zisťoval radiouhlíkovou metódou. Tento výskum robil v oblasti Hydarebadu v Indii, kde sú saprolitové (vrchná zvetralinová zóna) a puklinové zóny približne rovnako mocné (Dewandel et al., 2006). Podložie tvoria granity a ruly s doleritovými intrúziami.



Obr. 11.: Konceptuálny model prúdenia podzemnej vody v oblasti Hyderabad (India). (Sukhia et al., 2006 in Vacková, 2014)

Znázorňuje v modeli prepojenie dvoch vrtov (BH-1 a BH-2) spoločnou puklinou a poukazuje na veľmi rýchly pohyb, a taktiež dotáciu zo vzdialeného zdroja (staršia voda). Ostatné vrty vykazujú pomalý, a z hľadiska plošného, menej významný obeh s vysokou koncentráciou chloridov. Efektívna infiltrácia v oblasti dosahuje približne 7-8 % a preferenčné cesty prúdenia sú v hĺbkach cca. 20 až 30 metrov. Vplyvom nadmerného čerpania a urbanizácie miznú plytké jazerá a vrchná zóna zvetralín je prakticky suchá. Preto sa v niektorých miestach čerpá podzemná voda z hĺbok 50 až 150 metrov (Sukhija et al., 2006).

Regionálnym odhadom podzemného odtoku v kolektore s puklinovou porozitou (v prostredí „hard rocks“) na základe koeficientu transmisivity a geomorflógie sa vo svojej práci zaoberá Krásny a Kněžek (1977). Metóda využíva Darcyho zákon a vychádza z jeho základného tvaru :

$$Q = k \cdot I \cdot F \text{ resp. } Q = T \cdot I \cdot b \text{ (m}^3/\text{s)}$$

k - hydraulická vodivosť (m/s), T- koeficient transmisivity (m²/s), b - šírka kolektoru (m), I - hydraulický gradient, F – plocha priečného rezu prúdovou oblasťou

Za predpokladu, že hladina podzemnej vody úzko korešponduje s povrchom terénu, a prúdenie podzemnej vody je viac - menej kolmé na smer povrchových tokov (zanedbanie v uzáverových profiloch vodných tokov), do tohto vzorca potom dosádzame namiesto hydraulického gradientu (I) stredný sklon zemského povrchu „S“ ($S = z \cdot V \cdot P$), kde z je vzdialenosť medzi vrstevnicami, V – celková dĺžka vrstevníc v ploche P. Táto hodnota sa dá ľahko odvodiť z digitálneho modelu reliéfu (z angl. DEM – Digital Elevation Model). Ďalej potom namiesto šírky kolektoru (b) dosadíme hustotu riečnej siete „H“ ($H = L/P \text{ (m/km}^2\text{)}$), kde L je celková dĺžka tokov v oblasti o rozlohe plochy P. Na zistenie tohto parametru možno použiť jeden z programov využívajúcich GIS (napr. ArcMap).

Následný upravený vzorec má tvar : $Q = T \cdot 2H \cdot S \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}\text{)}$

Q je potom špecifický podzemný odtok v oblasti.

Hodnotením priemernej transmisivity (T) a priepustnosti (K – hydraulická vodivosť) v horských územiach hydrogeologického masívu nepriamymi metódami sa v krátkej správe zaoberá aj Jetel (2002). Uvádza v nej možnosť využitia hydrometrických metód ako interpretácie základného odtoku vo vzťahu k Darcyho zákonu a geomorfológii povodia. Jedna sa opiera o správu od Charatišviliho a Zedginidzeho (1969), ktorá navrhuje odhadnúť priemernú transmisivitu oblasti jednoducho ako funkciu základného odtoku, sklonu hlavného drenážneho toku a jeho dĺžky podľa vzorca :

$$T_{od} = Q / (z_2 - z_1),$$

kde Q – základný odtok (m^3/s), z_1 – nadmorská výška bodu, v ktorom hlavný drenážny tok opúšťa sledovanú oblasť, z_2 – nadmorská výška bodu, kde hlavný drenážny tok vstupuje do oblasti.

Napriek jednoduchosti a nepresvedčivej logike dáva v horských oblastiach tento postup prijateľné výsledky. Jetel (1997) ďalej podal aj súhrnný prehľad skúsenosti zhodnotenia transmisivity na základe hydrochemických metód, ktorá aplikuje vzťah medzi charakteristickým chemickým zložením vôd, a časom trvania jej kontaktu s horninovým prostredím, resp. rýchlosťou prúdenia. Metódy sú avšak implementované najmä pre horské oblasti Slovenska s väčším podielom karbonátových hornín.

Za zmienku stoja aj štúdie na determináciu jednotlivých puklín a odhad ich hydraulických vlastností vo vrtnom profile mimo klasické karotážne metódy ako je termometria, rezistivimetria, kavernometria a pod. Napr. Brainerd a Robbins (2004) určovali pomocou riedenia stopovača uraninu do ustálenej koncentrácie v rulovom podloží 4 charakteristiky : pozíciu a transmisivitu puklín, hydraulickú výšku v puklinách a charakter prúdenia v okolitom prostredí. Postup v tomto prípade predstavoval konštantné odčerpávanie vody z vrtu a injektáž uraninu do spodnej časti, kým nedôjde k ustálenej koncentrácii a následné sledovanie jeho koncentrácii v celom profile počas riedenia v dôsledku prítokov/odtokov z aktívnych puklín.

6.2. Podzemné hrádze

Vybudovanie podzemnej hrádze so špecifikáciami a cieľom aké má lokalita Meziboří je v Českej republike, ale aj zahraničí vcelku nekonvekčným projektom. V ČR sa aplikujú jednoduché tesniace clony pri stavebných zásahoch proti pretečeniu podzemnej vody, pri sanačných zásahoch na zastavenie prúdenia kontaminovaných vôd, ale aj napríklad ako injektované clony do telies povrchových hrádzí na ich zefektívnenie a revitalizáciu. Vo veľkom rozsahu sa využívajú tesniace podzemné clony naopak ako protipovodňové opatrenie napr. pri technológii tenkej tesniacej steny : vibračné predrazenie profilu a vyplnenie samo-tvrdnúcou suspenziou. Iné technológie predstavujú najmä pilotové steny, tvorené zo sústavy nevystužených a vystužených pilot. Najmodernejšiu variantu potom predstavuje technológia hĺbkového miešania zemín (DSM – Deep Soil Mixing).

Do povedomia sa v posledných desaťročiach dostávajú podzemné hrádze v rozvojových krajinách s nedostatkom pitnej vody, alebo v jej ťažko prístupných zdrojoch napr. v Indii, Indonézii, alebo vo východnej Afrike. Tie sa ale opierajú o oblasti mierne svažitých riečnych údolí, ktoré poskytujú prostredie s dostatočnou primárnou porozitou a akumulácnym priestorom. Pri oblastiach s vyšším topografickým gradientom naopak bývajú navrhované klasické, povrchové hrádze (Gur a Spuhler, 2019). Podzemné hrádze v tomto prostredí sa navrhujú obvykle do hĺbky niekoľkých metrov, v delte úzkoprofilových tokov. Tie siahajú až k nepriepustnému podložiu hornín, prípadne ílov. Podľa materiálu na výrobu sa delia obvykle na kamennú (murársku), železobetónovú, alebo zemnú. Zemná sa v tomto prípade vyskytuje iba zriedka vzhľadom na možnosť poškodenia a jej náročnosť vyhotovenia.

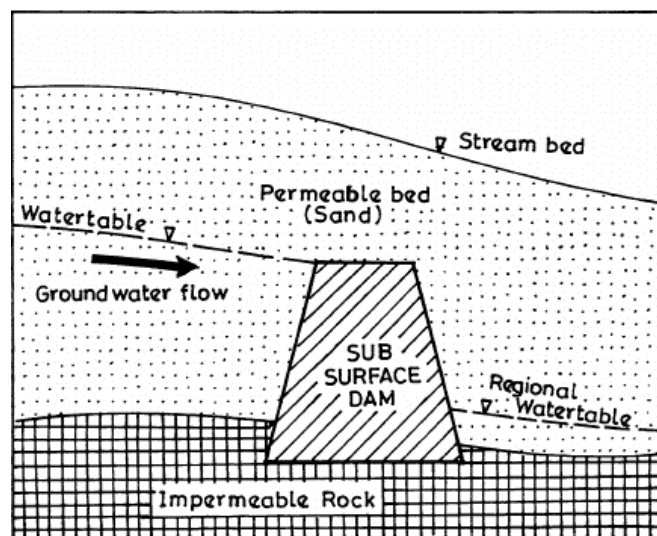
Za hlavné výhody sa považuje zamedzenie výparu, kontaminácie (prirodzená filtrácia), uchovanie prívalových sezónnych dažďov, ale aj zamedzenie rozmnoženia nebezpečného hmyzu (komárov),

a ako hlavná nevýhoda sa ukazuje zníženie hladiny a redukcia odtoku v dolnom profile zvodne od hrádze.

Podzemnou hrádzou ako jedným z možných postupov umelého obohatenia podzemnej vody v hydrogeologickom masíve sa okrajovo zaoberá Singhal (1997) :

V správe uvádza ako hlavný postup dopĺňania podzemných zdrojov vody infiltračné nádrže na príkladoch v Indii. Z týchto nádrží vybudovaných v povodí tvorených v podloží z kryštalinických hornín ukázali niektoré štúdie v oblasti Tamil Nadu rýchlosť infiltrácie od 0,05 do 1,5 m/deň bezprostredne po prítoku vody do nádrže, a časom sa postupne znižuje. Ročné straty odparovaním sú zhruba 5 %.

Ako jednu z alternatívnych a používaných metód potom uvádza aj podpovrchovú hrádzu. „Podpovrchové hrádze sú realizovateľné v úzkych a mierne svahovitých údoliach, kde sa podložná hornina vyskytuje v plytkých hĺbkach, prekrytých údolnou výplňou s mocnosťou 4 - 8 metrov.“ Podpovrchová priehrada sa skladá z nepriepustnej steny, ktorá je postavená z nepriepustného materiálu ako tehly a betón. Tiež sa používa dechtová plst', živica, polyetylénové fólie a bitúmen. Teleso hrádze zvyčajne prebieha od hĺbky 1 m pod povrchom zeme. Prvé podzemné priehrady boli vybudované už pradávnو. Existujú príklady takýchto stavieb z ostrova Sardínia z obdobia Rímskej ríše, a z Tuniska. V posledných rokoch táto metóda využívania podzemnej vody získala popularitu v Indii, južnej a východnej Afrike, Brazílii a Japonsku. V Indii boli takéto priehrady postavené v južnom štáte Kerala, kde sa voda používa na zavlažovanie. Pomer prínosu a nákladov jednej takejto priehrady bol odhadnutý na 1,06 (Sinha, Sharma, 1990).



Obr. 12.: Schéma podzemnej hrádze. (Raju, 2006)

7. Riadená, umelá dotácia podzemných vôd

V súčasnosti sa považuje intenzívne využívanie zvodnených vrstiev (kolektorov) za jednu zo zásadných environmentálnych otázok spojených s ďalšími fenoménmi ako sú klimatické zmeny, spôsob využitia pôdy a pod. Preto využívanie podzemných vôd ako obnoviteľného zdroja hrá v tejto otázke veľkú úlohu. Príkladom na efektívne využitie podzemnej vody je v mnohých oblastiach umelá infiltrácia, teda jej riadené dopĺňanie, a následné využívanie. Predstavuje vo svojej podstate jedinú možnosť hospodárenia s podzemnými vodami, pri ktorých eliminujeme, alebo minimálne zmierňujeme účinky čerpania (využívania) podzemnej vody na dlhodobú stabilitu zvodnenej vrstvy v kolektore (Abellán, 2017).

Infiltrácia sa v širšom merítku môže deliť na prirodzenú, spôsobenú prírodnými pochodmi bez zásahu človeka, vtedy ide hlavne o zrážkovú vodu, vodu z topenia snehu a vodných nádrží, a umelú, vyvolanú umelým zaplavením povrchu zeme, pre lepšie hospodárenie a využitie podzemnej vody najmä pre pitné, ale aj úžitkové, či závlahové účely.

Umelá infiltrácia teda predstavuje riadené vsakovanie povrchovej vody z nádrží, rýh a iných vsakovacích objektov a jej prirodzenú filtráciu v podzemí až k odberným objektom. Z hľadiska dlhodobého udržania využiteľnej vody pre pitné účely sa jedná o efektívny spôsob ako zachytiť vodu v horninovom prostredí na dlhší čas a riadene ju využívať. Tento spôsob „prírodného“ čistenia a zachytenia vody v najlepšej kvalite je využiteľný najmä pri miestach s vysokým výskytom kontaminácie, či už z poľnohospodárstva, alebo domácnosti. Takisto je efektívnosť tohto riešenia znásobená v oblastiach s vysokým špecifickým odtokom vôd, s krátkou dobou zdržania, teda v prostredí pevných, málo priepustných hornín so svažitým terénom (Bouwer, 2002).

V závislosti na pôvode vody, ktorá dopĺňa kolektor možno vyčleniť systém povrchového dopĺňania (nádrže, rýhy a zákopy), a podpovrchového (vrty, radiálne drenážne vrty apod.). Podpovrchové systémy sú ale zvyčajne drahšie (Foreman, 2014).

Voda vstupujúca do systému (Abellán, 2017) :

a) efektívna infiltrácia zo zrážok – malá fyzikálnochemická úprava, v oblastiach s koncentrovanými zrážkovými udalosťami v relatívne krátkom časovom období v roku – nutnosť vytvoriť bariéry, hrádze, priehrady na zachytávanie vody a jej prípadnú následnú infiltráciu.

b) z povrchových tokov a nádrží

c) „návratová“ voda z antropogénnej činnosti – zalievanie, odpadová voda, úniky z mestskej vodovodnej siete a pod.

d) budovanie umelých mokradí a voda dodávaná kvôli stavebnej, či inej industriálnej činnosti

e) voda zo susedných, či vzájomne prekrývajúcich sa kolektorov, ktorá sa pohybuje vertikálnym, či subhorizontálnym smerom

Z iného pohľadu možno rozdeliť spôsob dopĺňania podzemnej vody na 3 celky : (**prírodné** (bez zásahu človeka), **indukované** (úmyselné, neúmyselné), priame umelé s ľudským zásahom - riadené (plánované) a **náhodné** (v dôsledku zavlažovania, úniku zo studní a priemyselných zón).

Hlavné ciele umelého dopĺňania podzemných vôd taktiež zhrnul v rovnakej práci Abellán (2017) :

ZVÝŠENIE A OPTIMALIZÁCIA ZDROJOV	ZMENA KVALITY VODY	OBNOVA NARUŠENEJ ROVNOVÁHY	OCHRANA PROTI PRÍPADNÝM PORUCHÁM
Redukcia / eliminácia zníženia hladiny z dôvodu čerpania.	Zlepšenie situácie pobrežných kolektorov vybudovaním bariér proti vnikaniu morskej vody.	Kompenzácia zníženia hladín podzemnej vody v dôsledku intenzívneho využívania.	Ochrana proti vniknutiu slanej vody do dôležitých pobrežných kolektorov.
Využitie kolektora ako prirodzený depozit.	Zmena kvality vody pre ďalšiu redistribúciu.	Vplyv na inžinierske stavby.	Vplyv na inžinierske stavby.
Využitie kolektora ako distribučnú sieť.	Zamedzenie vnikaniu polutantov do neznečistenej vody.	Využitie pôdy.	Využitie pôdy.
Produkcja pitnej vody.	Úprava a odstránenie odpadných vôd z miest vďaka automatickým čističkám.	Zachovanie a obnova ekosystémov súvisiacich s kolektormi. (mokrade)	Zachovanie a obnova ekosystémov súvisiacich s kolektormi. (mokrade)
Kompenzácia strát prírodných zdrojov v dôsledku antropogénnych zásahov.			

Tab. 1.: Prehľad cieľov umelého dopĺňania podzemných vôd v 4 kategóriach. (podľa Abellána, 2017; upravené)

Umelá infiltrácia vyžaduje priepustné pôdy a zvetralinovú vrstvu na povrchu. Ak nie sú prirodzene dostupné na zlepšenie infiltrácie môžeme použiť aj rôzne infiltračné ryhy, priekopy a jamy, a ich dno vyplniť lepšie priepustným materiálom, a tak zefektívniť celý proces. Pri navrhovaní technického riešenia umelého dopĺňania podzemnej vody sa musí stanoviť miera infiltrácie pôdy, a musí byť kontrolovaná nesaturovaná zóna, aby sa zistila jej primeraná priepustnosť a taktiež eliminovali prípadne znečistené oblasti v okolí (Bouwer, 2002).

Podzemná voda tvorí viac ako 98% tekutej sladkej vody na planéte. Preto je prírodná miera dopĺňania podzemných vôd zo zrážok dôležitá pre riešenie manažmentu jej využívania. Predstavuje ju takzvaná efektívna infiltrácia. Jedná sa o rozdiel vstupov (množstva zrážok spadnutých na povrch zeme podporenej brehovou infiltráciou do zvodní z riek, jazier a iných povrchových tokov a nádrží), a výstupov = evapotranspirácia a samotný prirodzený odtok, či už hypodermický, povrchový, alebo základný (špecifický). Prirodzená efektívna infiltrácia do podzemných vôd predstavuje hodnoty v priemere 30-50 % v mierne vlhkom podnebí, 10-20% v miernom stredomorskom podnebí a 0-2% v suchom podnebí, z celkového množstva zrážok (Bouwer, 1989).

Miera prirodzeného dopĺňania podzemných vôd sa podpisuje taktiež pod vek podzemných vôd, ktorý môže byť od pár hodín, alebo dní v prameňoch humídnej klímy, alebo v oblastiach s veľmi plytkým obehom podzemnej vody a v oblastiach s vysokými zrážkami. Desiatky, až viac ako 1000 rokov potom v suchých klimatických oblastiach s hlbokým obehom podzemnej vody, alebo izolovaných kolektoroch podstatne vzdialených od miest prirodzenej infiltrácie (Tyler et al., 1996).

Možno očakávať, že umelá infiltrácia a riadené využívanie podzemnej vody sa stane preto v budúcnosti s nárastom populácie stále viac potrebnejšou a diskutovanejšou témou. Keďže efektivita spočíva v skladovaní vody v čase jej nadbytku, a kontinuálneho využitia v čase nedostatku. Tradičný spôsob uchovania vody vo väčšom merítku – v priehradách sa zdá byť do budúcnosti viac komplikované riešenie, ktoré so sebou prináša nemalo problémov. To sú najmä výber správneho miesta, výpar vody v suchších oblastiach (2m/rok), nutná lepšia úprava, zanášanie sedimentom, potenciálne zlyhanie materiálu (stavby) a podobne (Devine, 1995). Takisto vysoké náklady a nevôľa verejnosti hrajú značnú úlohu pri plánovaní rozsiahlejšej povrchovej hrádze. Naproti tomu podzemné uchovanie vody má prakticky nulový výpar a často aj lepšie politicko – ekonomické a iné aspekty, ktoré sú diskutované aj v práci od Asana (1985).

7.1. Štúdie a príklady vo svete

V celosvetovom merítku vykazujú najväčšie odbery podzemnej vody najmä pre zavlažovacie účely štáty ako India (68 000 hm³/rok), Pakistan (35 000 hm³/rok), U.S.A. (30 000 hm³/rok), Severný Irán (20 000 hm³/rok), Severná Čína (20 000 hm³/rok), Južné Mexiko (10 000 hm³/rok), centrálny región Saudskej Arábie (10 000 hm³/rok) a oblasti s nedostatkom vody v okolí Stredozemného mora (Tunisko, Alžírsko, Líbya, Izrael atď.) (1 hm³ = 1 000 000 m³). V Európe sú kolektory s najväčšou mierou intenzívneho využívania situované najmä na juhovýchode pyrenejského polostrova (oblasť Levante), na Kanárskych ostrovoch a v iných oblastiach Španielska (Abellán, 2017).

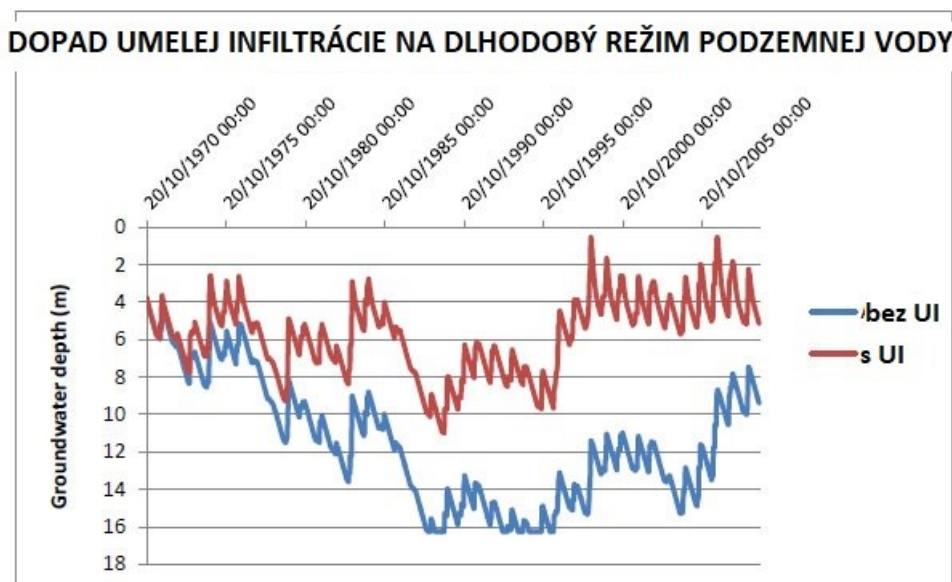
V posledných desaťročiach bol zavedený pojem technológie umelého dopĺňania podzemnej vody, v medzinárodnej skratke známy najmä ako „AR“ - Artificial Recharge, alebo „MAR“ - Management of Artificial Recharge (Fernández-Escalante et al., 2005a).

Definícia „artificial recharge“ podľa Bouwera (2002) : „Nástroj vodného hospodárstva, ktorý zahŕňa sériu technologických postupov, pri ktorých sa umelo dopĺňa kolektor priamo zasakovaním vody, alebo sa navodzujú lepšie podmienky v kolektore, pre zvýšenie dostupnosti podzemnej vody a zaručenie jej stálej úrovne, či už z hľadiska kvality, alebo množstva.“ Kolektor musí byť ale v značnej miere ohraničený nepriepustnými vrstvami a izolovaný od ostatných.

Táto technika stojí ako jediná na čele intenzívneho využívania podzemných vôd bez dlhodobých regresných vplyvov na kvalitu a kvantitu vody v kolektore, ako aj z hľadiska jej sociálnoekonomického a environmentálneho dopadu (Galloway et al., 2003; Konikow, Kendy, 2005). Je v súčasnosti široko implementovaná v mnohých krajinách. V niektorých krajinách (Nemecko, Anglicko, Holandsko, Spojené štáty americké atď.) je to dokonca nevyhnutný proces v hospodárení s vodnými zdrojmi (Biswas, 2008). V skutočnosti je táto technológia často jedným z najúspornejších mechanizmov dodávok pitnej vody v mestách a malých komunitách (Dillon, 2005).

Nepriamy základ pre tento spôsob využitia podzemnej vody podal už v roku 1877 Theim na príklade teórie brehovej infiltrácie, ktorá predstavuje využívanie studní, či iných čerpacích zariadení v závislosti na vzdialenosti od brehu vodného toku. Umelá infiltrácia z hľadiska dlhodobej prevádzky sa najviac uplatňuje z európskych krajín v Nemecku.

Dopadom umelej infiltrácie na trvalejšie udržanie hladiny podzemnej vody sa zaoberal aj projekt indického ministerstva vodných zdrojov „Hydrology project“ (2008) v časti na podporu v rozhodovaní o využití vodných zdrojov „DSS“ (decision support systems). Obsahuje databázy modelov pohybu podzemných vôd v rôznych povodiach pre lepšie rozhodovanie v otázkach využívania podzemnej vody.



Graf 2.: Model dlhodobého pohľadu na udržateľnosť podzemnej vody dotáciou umelej infiltrácie. (Hydrology Project, 2008)

Abellán (2017) vo svojej práci potom uvádza celkom špecifické prípady cieľov umelého dopĺňania podzemných vôd ako napríklad : vytváranie umelých podzemných „bariér“ tvorených z rady vrtov pri pobreží, do ktorých sa injektuje sladká voda, a tým sa zamedzuje prenikanie slanej, mineralizovanej vody z mora ďalej do vnútrozemia. Podľa Foremana (2014) však tento spôsob nie je vhodný pre veľmi priepustné horniny.

Ďalej sa využíva umelá infiltrácia pre zabránenie poklesu pôdy v dôsledku nadmerného čerpania a poklesu tlakov v póroch, alebo ako nástroj na opätovné využívanie odpadných vôd vsakovaním do horninového prostredia – najmä v oblastiach semiaridných a aridných, kde sa môže takto upravená voda používať na úžitkové, alebo závlahové účely (Megdal, Dillon, 2015).

Na príklade v Holandsku, kde znečistená voda z rieky Rýn prejde základnou úpravou a následne sa injektuje do pobrežných dún, tým sa môže ďalej riadene využívať a pôsobí následne aj ako riadiace médium na „zatlačenie“ morskej vody (FCIHS, 2011). Podobné projekty sú plánované aj v Španielsku, provincii Barcelony využitým hlbokého kolektoru značne rozsiahlej delty rieky Llobregat.

Ďalej záplavové (bezpečnostné) prepady (z angl. spillways), ktoré sú známe najmä z Kalifornie. Sú tvorené systémom retenčných hrádzí a prídavných vsakovacích polí, ktoré spolu tvoria účinný systém protipovodňovej ochrany, a zároveň zlepšujú prirodzené dopĺňanie vody do podzemných zdrojov (Dillon, 2005; Foreman, 2014). Celý systém v podstate znižuje základný špecifický odtok v oblasti z potokov položených vo vyšších nadmorských výškach a zabraňuje prípadným povodňam.



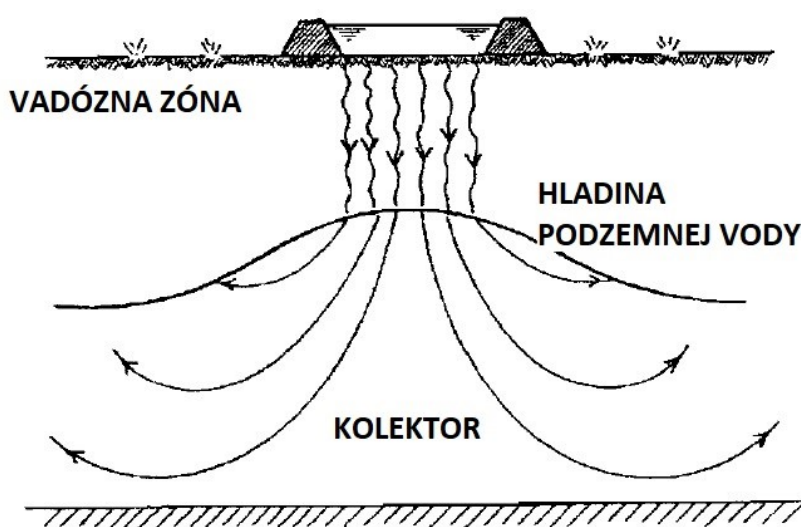
Obr. 13.: Schéma protipovodňovej ochrany z vysokých zrážok, ktoré odvodňujú horské potoky smerom do údolia a systému umelého dopĺňania z infiltračných nádrží v údolí Santa Anita (Kalifornia, U.S.A.). (podľa Custodio, Llamas, 1983; upravené)

Hydrodynamický mechanizmus umelej infiltrácie z infiltračnej nádrže podľa Abellán (2017) :

Autor zhrňuje proces umelého dopĺňania podzemnej vody do 4 fázy :

- a) Vytvorenie a rozšírenie infiltračnej „hl’uzy“ v nesaturovanej zóne.
- b) Vydutie piezometrického povrchu hladiny podzemnej vody.
- c) Spojenie týchto dvoch celkov a dopĺňanie v ustálenom stave.
- d) Vymiznutie a dokončenie dopĺňania vody z povrchovej nádrže/ryhy.

Pri konštantnom dopĺňaní (infiltrácii) z povrchovej nádrže sa voľná hladina vzdúva a jej celková výška rastie až do stavu, kedy dosiahne dynamickej úrovne a kontrolného limitu, ktorý predstavuje drenážnu oblasť (riečka, umelý vývod a pod.) (Bouwer, 2002).

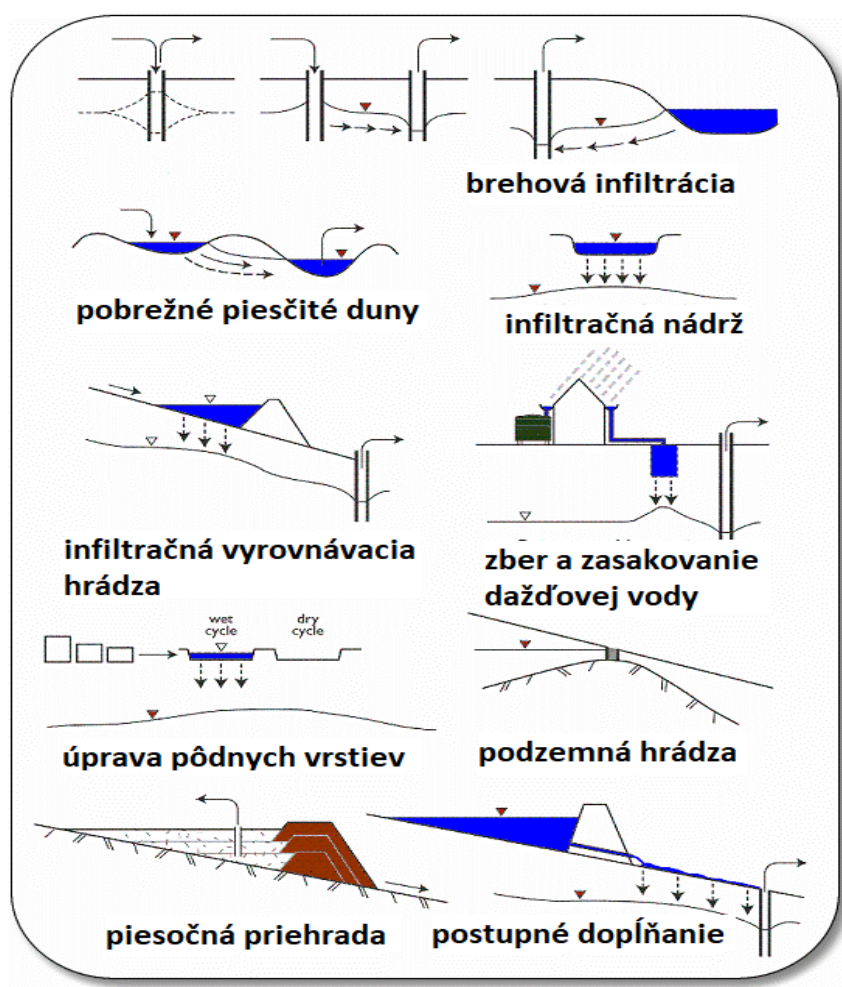


Obr. 14.: Schéma ustáleného dopĺňania podzemnej vody infiltračnou nádržou. (Abellán, 2017; upravené)

Týmto spôsobom, akonáhle sa dosiahne kontrolný limit, tak nedochádza k žiadnym zmenám v objeme vody a do kolektora sa privádza toľko vody, koľko sa z neho dostáva preč (čerpaním, drenážou a podobne). Takéto dopĺňanie zdroja sa preto označuje ako „dopĺňanie v ustálenom stave“.

Na záver, keď dopĺňanie skončí, zmizne „vydutý“ povrch hladiny, pretože voda uložená nad piezometrickou úrovňou zostáva dočasne v nesaturovanej zóne. Akonáhle je dopĺňanie dokončené voda postupne prúdi subhorizontálne do strán, až kým nevytvorí prirodzený piezometrický povrch (Fernández-Escalante, 2004, podľa Abellán, 2017).

Autor (Abellán, 2017) na záver zhrňuje, že technológia umožňuje dosiahnuť nielen dopĺňanie vody do kolektorov v čase jej prebytku, ale aj iné pozitívne sekundárne procesy ako čistenie, boj proti infiltrácii morskej vody a podobne. Táto technológia avšak vyžaduje značné množstvo vody, ktorej je v suchých a polosuchých oblastiach nedostatok, resp. sa miera hospodárenia s vodou v týchto krajinách nedostala na požadovanú úroveň ako vo vyspelejších oblastiach. Aby sa táto technológia pomaly dostala aj do krajín, ktoré sú v rámci vodohospodárskeho riadenia zaostalejšie bude potrebné pritiahnúť do tejto problematiky mnoho zainteresovaných strán, ako aj politických predstaviteľov, poľnohospodársku obec a podobne.



Obr. 15.: Rôzne technické riešenia umelého dopĺňania podzemných vôd. (Groundwater Dictionary, 2019; upravené)

Ako už bolo spomínané, vo svete sa problematikou riadeného využívania zvodní zaoberajú štúdie vo veľkej časti orientované na semiaridné a aridné oblasti s nerovnomerným rozložením zrážok. V roku 2005 publikovala medzinárodná asociácia hydrogeológov (IAH), konkrétne komisiou pre riadené využívanie zvodní (MAR), s podporou medzinárodného hydrologického programu UNESCO (IHP) a hlavným editorom Ianom Galem (2005), krátke zhrnutie možností riadeného využívania podzemných vôd, ako aj jej konkrétne príklady. Toto zhrnutie je cielené pre oblasti so semiaridnou klímou. Ako rada ďalších autorov (Bouwer, 2002; Asano, 1985) poukazuje na úvod pozitívny prínos umelej infiltrácie (umelého využívania podzemných zdrojov vody) pre komplexné a efektívne využívanie podzemnej vody z hľadiska kvalitatívnej aj kvantitatívnej dlhodobej udržateľnosti. Uvádza hneď príklad dedinských aglomerácií v Indii, kde výstavba infiltračných nádrží a priehrad k dopĺňaniu podzemných vôd bola známa už pred 3000 rokmi.

V novodobej histórii sa nekontrolované využívanie podzemných vôd v indických masívoch kryštalinika negatívne premieta na poklese hladín v týchto oblastiach (ploche zhruba 340 000 km²). Preto bol v Indii plánovaný projekt riadenej infiltrácie výstavbou priehrad, nádrží a pod., ktoré by dotovali zasiahnuté oblasti (Chadha, 2003).

V tejto správe autor (Gale, 2005) uvádza rôzne prípady umelého využívania podzemných vôd a to z hľadiska vlastností (pôvodu) infiltrovanej vody, charakteru podložia a takisto technologického riešenia.

Pre typ hornín hydrogeologického masívu, ktoré sú predmetom nášho záujmu uvádza ako hlavný predpoklad spoľahlivého využitia umelej infiltrácie nájdenie dostatočne zvetraných a rozpukaných zón pre lepšiu akumuláciu podzemnej vody. Efektivita v tomto prípade závisí na spôsobe aplikovania vody do podložia – vsakovacími nádržami v prípade dostatočne mocného elúvia (zvetralinovej vrstvy), alebo pri väčších hĺbkach v prostredí rozpukanej horniny injektážou z vrto.

PRÍKLADY UMELEJ INFILTRÁCIE VO SVETE

1.) Za zmienku stojí umelá infiltrácia odpadnej vody v meste **Atlantis v Južnej Afrike**. Toto mesto získava vďaka tomuto opatreniu pitnú vodu v množstve cca. $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. V tejto oblasti spadne za rok cca. 450 mm zrážok a 65 % z toho v mesiacoch september až máj. Podložie pre infiltrovanú vodu tvoria kenozoické pieskovce nepravidelne mocné od 25 m do 60 m. Pod nimi ležia droby a bridlice. Pieskovce tvoria lokálne ohraničené zvodne kvôli rýchlym faciálnym zmenám s transmisivitou od 50 do 1300 $\text{m}^2/\text{deň}$. V celkovom poňatí predstavuje tento príklad systém infiltračných nádrží nad dotovaným územím, do ktorých sa privádzajú zmiešané odpadné (z domácnosti) a dažďové vody, ktoré prejdú základnou úpravou a sú tak recyklované, a zároveň prídavných nádrží pri pobreží, kde sú drénované priemyselné, nevyužiteľné odpadné vody, ktoré sa týmto likvidujú, a zároveň zabráňujú prenikaniu morskej vody. Tento systém funguje už viac ako 30 rokov a je vysoko rentabilný (20% nákladov z toho, koľko by stála dodávka pitnej vody potrubím) (Tredoux et al., 2003).

2.) Ďalším príkladom je umelá infiltrácia do rozpukaných tvrdých kvarcitov v oblasti hlavného mesta **Namíbie, Windhoek**. Mesto sa nachádza v centrálnej vysočine Namíbie a až do roku 1970 bolo zásobované iba podzemnou vodou. Kolektor je momentálne iba záložným zdrojom pre povrchovú vodu z veľkej priehrady. Perspektívnosť vybudovania technológie umelej infiltrácie sa môže naplno prejaviť v období sucha, kedy môže byť kolektor hlavným zdrojom vody. Momentálne predstavuje využitie zo zvodne zhruba 10 % z celkovej spotreby. Geologicky predstavuje tak ako v našom prípade Meziboří z hľadiska tektoniky a zvrásnenia výrazne anizotropné prostredie s nejasným vymedzením čiastkových zvodní. Z hľadiska rentability bolo teda nutné vybrať miesta s najlepšou storativitou, čo bolo docielené injektážnymi skúškami. Do vybraných vrtov sa ďalej injektuje upravená pitná voda z priehrad mesta, ktorá ale prešla ešte druhotnou úpravou aktívnym uhlím a chlôrovaním. Následne bol vo vybraných oblastiach navrhnutý trojfázový projekt, ktorý počítal s navyšovaním injektážnej kapacity, teda aj počtom injektážnych vrtov až na 16 m^3/rok (90% súčasnej ročnej spotreby) (Murray, 2004).

3.) Príklad z južnej **Sierra Nevady v Španielsku** poukazuje na využitie vody v období jej nadbytku v dôsledku topenia snehu. Voda z vysokých stavov riek je presmerovaná do nádrží vo vysoko-priepustných oblastiach. Podložie je taktiež tvorené kryštalinickými horninami. Je infiltrovaná v zónach s vysokou priepustnosťou, teda v podloží s vysokou mierou zvetrania a tektonického porušenia. V oblasti drenáže pod svahom sa vytvorili 2 druhy prameňov, ktoré dotuje infiltrovaná voda. 1. - dočasné, ktoré má na svedomí rýchly povrchový odtok vody prevažne v pôdnom horizonte. Voda z týchto prameňov sa používa ako závlahová. A 2. - celoročné, ktoré dotujú priľahlé dediny pitnou vodou. Voda v týchto prameňoch má cca. 2-krát vyššiu dobu zdržania v horninovom prostredí (10 dní - oproti 5 dňom z dočasných prameňov) a z toho vyplývajúcu aj vyššiu kvalitu (Pulido, Bosch, 1995).

IZRAEL

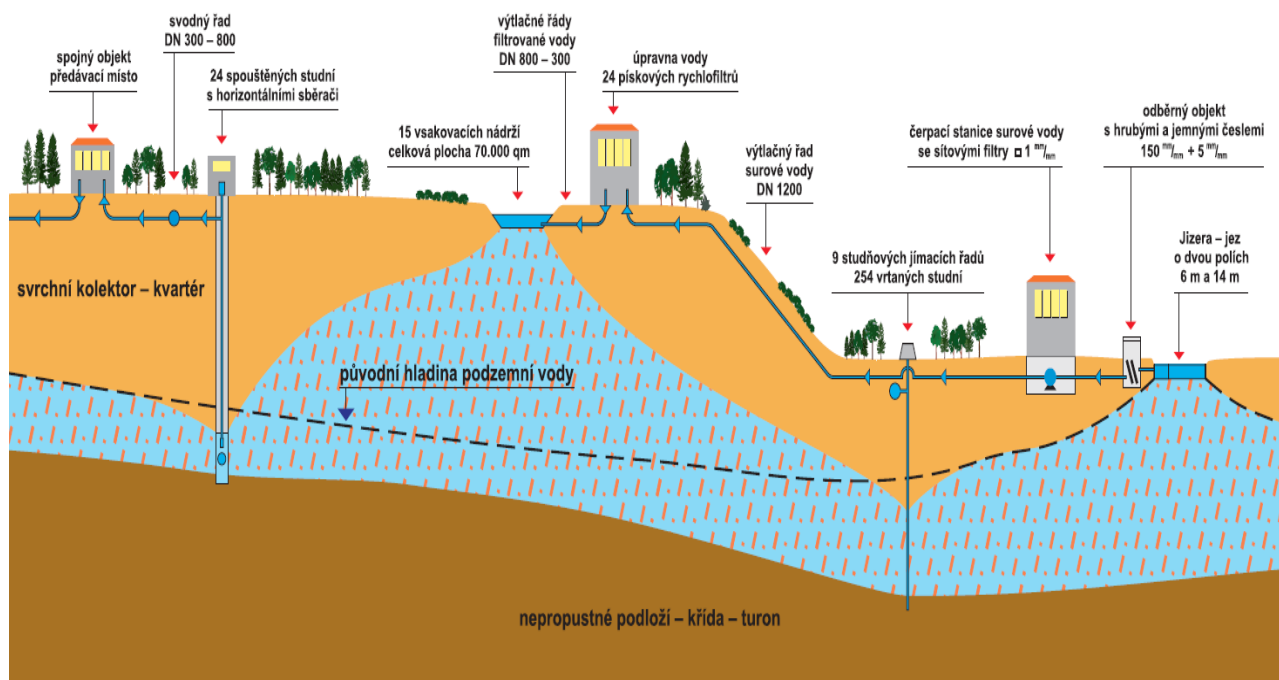
Väčšiu polovicu pitnej vody v Izraeli obyvatelia získavajú z Galilejského jazera a rieky Jordán. Zbytok predstavuje využívanie z podzemných zdrojov. Tie pochádzajú z dvoch hlavných kolektorov. Horského, resp. vyššie položeného a pobrežného. Pobrežný kolektor je tvorený zo skrasovatelých značne priepustných vápencov, ktoré sú náchylné na prenikanie morskej vody. Izrael má s umelou infiltráciou dlhé skúsenosti a zasakuje sa tu čistá povrchová, ako aj odpadná voda. Odpadná voda predstavuje v riešení umelej infiltrácie zvláštnu kapitolu. Už od roku 1977 sa do pobrežného kolektoru neďaleko od Tel Avivu zasakuje predčistená odpadná voda. Ako bolo spomínané tento koncept je prospešný aj ako bariéra pre prenikanie morskej vody do kolektoru ďalej do vnútrozemia. Mimo to je voda takto vyčistená na štandardy pitnej vody a výrazne sa tým zefektívňuje aj hospodárenie s vodou celkovo. Podobne ako v Českej republike vo vodnom zdroji Káraný je koncept, resp. technické riešenie založené na vsakovacích nádržiach v piesčitom dnom a radom čerpacích a monitorovacích vrtov (Hrkal, 2010b).

7.2. Umelá infiltrácia v Českej republike a na Slovensku

Najznámejší príklad umelej infiltrácie v Čechách je komplex vsakovacích nádrží a čerpacích vrtov vo vodnom zdroji Káraný, ktorý zásobuje pitnou vodou v prevažnej väčšine hlavné mesto Prahu a čiastočne aj Stredočeský kraj.

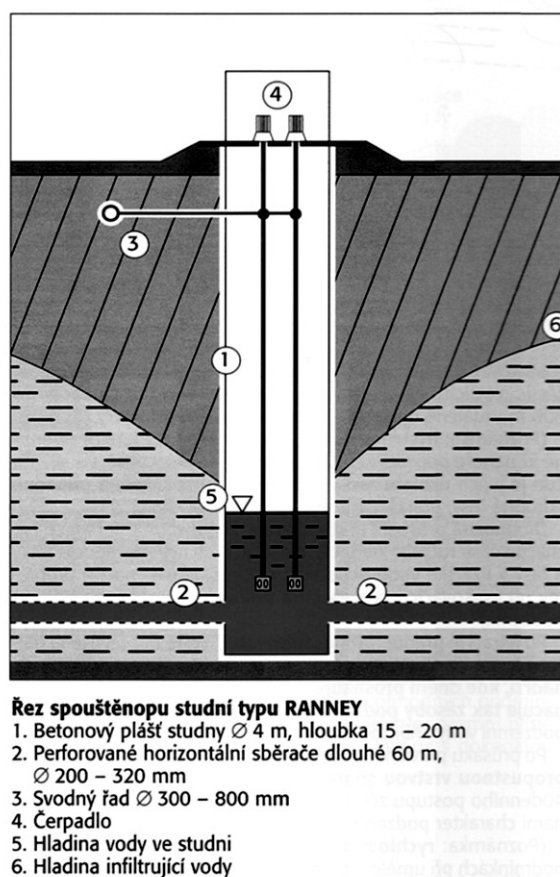
Samotný vodný zdroj je tvorený štvrtohornými štrkovými a štrkopiesčitými náplavmi a v podloží potom sedimentami kriedy. Umelá infiltrácia v Káranom bola vybudovaná v rokoch 1965 – 1969. Prevádzka samotnej úpravne vody bola zahájená už v roku 1915, ktorá bola neskôr doplnená o technológiu umelej infiltrácie. Táto technológia bola vybudovaná v rámci akcie „Rozšíření vodárny v Káraném“ a zaznamenala takmer zdvojnásobenie vtedajšej výroby pitnej vody (zdroj – 900 l/s) (Herčík, 2008).

Vlastný koncept umelej infiltrácie a vodného zdroja pozostáva z viacerých objektov, ktoré sú znázornené na obrázku nižšie. Prvotným je jez na rieke Jizera, ktorý slúži na udržanie minimálnej hladiny pre odber vody. Voda sa ďalej čerpá v staniciach so sieťovými filtermi a prechádza potrubím na základnú úpravu cez pieskové rýchlofiltre. Ich celková filtračná plocha je 1440 m². Následne je voda čerpaná do 15 vsakovacích nádrží o ploche celkom 70 000 m². Z dôvodu kolmatácie a zanášania nádrží organickým materiálom je dno každej nádrže pravidelne čistené a to tak, že sa odoberie vrchná zhruba 3-5 cm mocná vrstva piesku a nahradí sa novou.



Obr. 16.: Schéma vodného zdroja Káraný. (Skalický, 2015)

K finálnemu odberu vody z horninového prostredia sa potom používajú radiálne studne s horizontálnymi zberačmi. Boli navrhnuté tak, aby zastihli hladinu podzemnej vody približne v 10 - 13 m pod povrchom. Studne majú priemer 4 m a každá ma dva horizontálne zberače orientované kolmo na smer prúdenia podzemnej vody (rovnobežne s radou vsakovacích nádrží). Autor v správe z roku 2008 v závere navrhuje rekonštrukciu filtrácie a technológie, keďže kvôli nestabilnej kvalite surovej vody býva proces infiltrácie často prerušovaný, a tým nie je dosiahnuté optimálne rovnovážne využitie. To spôsobuje zrejme aj výkyvy, resp. dlhšiu dobu zdržania podzemnej vody ako v pôvodnom projekte (v projekte 30 dní, v skutočnosti 50 - 60 dní).



Obr. 17.: Rez radiálnou studňou pre odber vody z VZ Káraný. (Herčík, 2008)

V menšej miere sa potom prevádzkovala umelá infiltrácia aj v Novom Bydžove, Luhu u Sušic, Přerove, ale aj pri Valašskom Meziříčí, pri Rokycanoch, alebo pri Uherskom Hradišti (Hrkal et al., 2016).

Pre tuzemské pomery v rámci Českej republiky bola v roku 2010 pre Ministerstvo životného prostredia spracovaná správa Výskumného ústavu vodohospodárskeho T. G. Masaryka, ktorá hodnotí územie z hľadiska vhodnosti pre umelú dotáciu podzemných vôd a možnosti umelej infiltrácie vyčistených odpadných vôd, pričom zároveň popisuje spôsob metodiky tohto hodnotenia (Hrkal, 2010c). Cieľom tohto projektu bolo na základe metodického postupu vybrať vhodné lokality pre možnosť využitia podzemných vôd týmto spôsobom. Treba dodať, že správa sa zaoberá hodnotením v celorepublikovom merítku a jednotlivé bližšie vymedzené lokality treba posudzovať ďalej individuálne, najmä podľa technologického riešenia. Preto správa udáva aj niekoľko typov umelej infiltrácie z hľadiska aplikácie :

1.) Infiltrácia za účelom intenzifikácie (zefektívnenia) významných odberov pitných vôd.

Hlavné využitie pozostávajúce z lepšieho hospodárenia a využitia podzemných zdrojov nielen z kvantitatívneho, ale aj kvalitatívneho hľadiska v prípade, že vsakovacie objekty sú dostatočne vzdialené od čerpacích a horninové prostredie má značnú filtračnú a adsorpčnú schopnosť.

2.) Vsakovanie na lokálnej úrovni za účelom spomalenia prirodzeného odtoku a zväčšenia zásob podzemnej vody.

Druhý prípad predkladá zvýšenie efektivity využitia podzemných vôd na malom území. Tu spadá aj prípad v Meziboří.

- a) Vsakovacia nádrž
- b) Zemné hrádze
- c) Podzemné hrádze
- d) Polopriepustné hrádze

3.) Infiltrácia predčistených odpadných vôd formou vrtov a vsakovacích nádrží.

Podľa Zajíčka (1970), Kněžka a Váši (1970) existuje 5 základných kritérií vhodnosti použitia umelej infiltrácie : štruktúra s dostatočnou vertikálnou priepustnosťou (prielinovou, puklinovo - prielinovou), dostatočná mocnosť kolektoru a jeho nesaturovanej zóny (priestor pre akumuláciu), vhodné štruktúrne geologické podmienky a prítomnosť dostatočného zdroja vody.

V našich podmienkach, ale aj vo svete pomáha ako doplnkový prostriedok umelá infiltrácia taktiež urýchliť a zefektívniť sanačný proces popri sanačnom čerpaní (Muzikář, 2002). Dopomáha v procese uvoľňovania kontaminantov z adsorbčne viazanej vody a zachytenia emulzií. V nasýtenej zóne kontaminovaného kolektoru sa na začiatku sanačného čerpania rýchlo znížia koncentrácie kontaminantu, avšak z následnej nesaturovanej zóny, v ktorej sa voda drží na pevných časticiach, je tento proces zdĺhavý a technicky náročný. Umelou infiltráciou sa preto zvýši hydraulický gradient a mocnosť saturovanej zóny. Zahraničné štúdie podľa autora preukázali vďaka tejto doplnkovej metóde dobu skrátenia sanačného čerpania až o 30 %. Treba však dbať aj na negatívne dopady ako je napríklad kolmatácia (upchávanie dna infiltračných nádrží a možné zamokrenie zemín v blízkosti budov).

Aktuálne je téma umelej infiltrácie v Českej republike spojená najmä s problémom sucha a regresným trendom v hladín podzemných vôd v studniach a vrtoch oproti dlhodobému priemeru.

V správe „Moderné technológie úpravy podzemných vôd“ Výskumného ústavu vodného hospodárstva uvádza Holubec (2001) technológiu umelej infiltrácie ako plošný prvok pre zvýšenie účinnosti procesu odstránenia mangánu a železa z podzemnej vody. To za predpokladu, že infiltrovaná voda obsahuje oxidačné látky, ktoré sú schopné migrovať do zvodneného prostredia. Táto metóda sa dá aplikovať, ak mocnosť zvodneného kolektoru nie je príliš veľká.

Na Slovensku sa však téma umelej infiltrácie dostala zatiaľ iba na veľmi lokálnu úroveň, kedy je prezentovaná ako vhodná metóda na vsakovanie odpadných vôd, či už z domácnosti, alebo priemyselných zón.

8. Numerické modelovanie v hydrogeológii

Podľa mnohých autorov, ako napr. Yeh a Chang (2013), sú numerické metódy vhodný, flexibilný a výkonný nástroj na riešenie mnohých problémov v prírodných podmienkach. Pomocou týchto metód založených na matematickom odvodení a zjednodušení rôznych prírodných procesov, dejov a štruktúr sú vytvárané modely, ktoré nám môžu simulovať určitý dej v závislosti na čase a priestore (v prípade trojrozmerného modelovania). Základom numerických metód je prevod parciálnych rovníc charakterizujúcich študovaný problém (v našom prípade – rovnosť hydraulických zákonov v sledovanej oblasti) na sústavu algebraických, ktoré sú následne riešené v počítači pomocou vhodného softwaru.

Matematické modely prúdenia podzemných vôd majú význam v prípade neideálnych príkladov, ktoré nie je možné riešiť analyticky, a poskytujú tak nástroj na zhodnotenie heterogenity prostredia, vstupných parametrov a ich premenlivosti v čase. Cieľom modelu je teda čo naj dôveryhodnejšia reprezentácia reality a popis hlavných vplyvov na modelovaný dej. Model prúdenia podzemných vôd je v mnohých prípadoch vhodné doplniť o modely transportu kontaminačných látok, a predísť tak problémom v oblastiach, ktoré sú náchylne na znečistenie zvodne (Nosek, 2009).

Numerické modely sú obvykle delené do dvoch hlavných prípadov :

- Model prúdenia podzemnej vody – výsledkom je rozloženie hladiny podzemnej vody v oblasti, z ktorej je možné určiť vektory prúdenia, bilanciu modelu a v dynamickom riešení potom jej časovú premenlivosť
- Model transportu látok – výstup je časovo - priestorová distribúcia koncentrácie látok v oblasti

Numericky bývajú potom riešené diferenciálne rovnice pomocou týchto metód :

1. Konečných diferencií („Finite Differences“) - pravouhlá sieť obdĺžnikov / štvorcov.

Jednoduchá metóda, ktorá sa používa najčastejšie pre riešenie riadiacich rovníc prúdenia kvapaliny v poréznom prostredí a transportu látok.

2. Konečných prvkov („Finite Elements“) - nepravidelná sieť mnohouholníkov (obvykle trojuholníky).

Efektívna metóda, ktorej hlavnou výhodou je neobmedzená možnosť prispôsobenia tvaru modelovej oblasti a tým aj lepšie výsledky pri jej okrajových častiach. Pôvodne bola táto metóda vyvinutá a používaná v leteckom inžinierstve a pri stavbe mostov. Nevýhodou je potom dlhá doba výpočtu a malá stabilita procesu výpočtu (Valentová, 2007; podľa Havlíková, 2010).

3. Konečných objemov („Finite Volumes“)

Medzná metóda na prechode medzi metódou konečných prvkov a konečných diferencií. Jej výpočetná oblasť tvorí sieť štvoruholníkov, pri ktorých sa ale dajú meniť uhly aj rozmery jednotlivých strán. Z časovej náročnosti je taktiež na pomedzí medzi „FD“ a „FE“ (napr. v programe Visual Modflow)

4. Metóda charakteristík („Method of Characteristics“)

Základný princíp je prevedenie sústavy hyperbolických parciálnych diferenciálnych rovníc na diferenciálne rovnice obyčajného typu. Výsledne rovnice sa potom riešia metódou konečných diferencií. Používa sa pre jej zložitosť veľmi málo (Havlík et al., 1992, podľa Havlíková, 2010).

Bližšie sa zameriame na metódu konečných diferencií, z ktorej vychádza model MODFLOW. Táto metóda predstavuje starú metódu, ktorá je jednou z prvých numerických metód. Vznikla ešte dávno pred príchodom výpočtovej techniky. Princíp diskretizácie metódy konečných diferencií (rozdielov) má 3 fázy (Žáková, 2014) –

1.) Oblasť je nahradená sieťou uzlov, ktoré spolu tvoria pravouhlú sieť. 2.) Funkcie v diferenciálnej rovnici sú nahradené sieťovými funkciami. 3.) Derivácie v uzloch siete sú nahradené pomernými diferenciami a následne je zložená sústava algebraických rovníc pre neznáme hodnoty riešenia.

Počet rovníc je teda daný počtom uzlov (čím viac uzlov, tým presnejší výsledok, ale aj zdĺhavejší výpočet a väčší výstupný súbor). Je založená na hľadaní riešenia v konečne veľa bodoch, ktoré tvoria spolu sieť obdĺžnikov, prípadne štvorcov Preto je niekedy nazývaná metódou sietí.

Matematicky je výpočet prúdového poľa v poréznom prostredí riadený Darcyho zákonom a rovnicou kontinuity. V tomto prípade aplikuje metódu konečných diferencií (rozdielov), na ktorej je založený model MODFLOW. Pre dvojrozmerné prúdenie potom platí vzťah (Chiang, 2002, podľa Nosek, 2009) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

Darcyho zákon pre 2D : S – storativita (-); Q – vsakovanie / čerpanie na jednotkovú plochu (m³/s); T – transmisivita (m²/s); h – hydraulická (piezometrická) výška (m).

Z prvého prípadu rovnice 2D prúdenia, v ktorej vystupuje transmisivita (T), hydraulická výška (h) a vstupy/výstupy toku (Q) sa potom dajú odvodiť aj zjednodušené rovnice pre popis prúdenia v homogénnej napätej zvodni :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = - \frac{Q(x, y)}{T}$$

Poissonova rovnica

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

Laplaceova rovnica (bez čerpania a vsakovania)

Program MODFLOW rieši nestacionárne 3D prúdenie vody s konštantnou hustotou v heterogénnom anizotropnom prostredí, ktoré je popísané kombináciou pohybovej rovnice a rovnice kontinuity. Pohybová rovnica je zapísaná Darcyho zákonom v tvare (Harbaugh, 2005) :

$$v_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, v_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, v_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

kde $v_{x,y,z}$ sú vektory hustoty toku (prietok jednotkovou plochou) v smere os súradnicového systému (m/s), K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} potom diagonálne zložky tenzoru hydraulickej vodivosti (m/s), a derivácia h podľa osy x , y , z potom hydraulické gradienty v smere osy súradnicového systému.

Všeobecná riadiaca rovnica sa dá potom zaviesť na tvar s hydraulickou vodivosťou pre tri hlavné smery (x , y , z) v heterogénnom anizotropnom prostredí. Základná parciálna diferenciálna rovnica prúdenia v 3D má potom tvar (Harbaugh, 2005) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Neustálené prúdenie nestlačiteľnej kvapaliny anizotropným nestlačiteľným prostredím.

W – objemový tok (prietok na jednotkový objem) – 1/s, ktoré reprezentuje zdroje, alebo odbery (W viac ako nula = prítok do modelu, W menej ako 0 = odtok z modelu), S_s – špecifická storativita (1/m) a t je čas (s). S_s a K môžu byť obecné priestorové funkcie polohy a W môže byť funkciou priestoru a času.

Táto rovnica, ktorá je doplnená o počiatočné a okrajové podmienky predstavuje matematický popis prúdenia podzemnej vody. Jej numerickým riešením získame aproximáciu funkcie h (x,y,z,t), ktorá určuje hodnotu hydraulickej výšky v priestore a čase.

Priestorová diskretizácia modelovej oblasti a riadiacej rovnice prúdenia (Harbaugh, 2005) :

V modeli MODFLOW je riadiaca rovnica prúdenia v diskrétnom tvare odvodená na blokovo centralizovanej sieti s uzlom v strede výpočetnej bunky. Rovnica potom vychádza z použitia rovnice kontinuity (súčet tokov do a z bunky je rovný rýchlosti zmene objemu (zásobnosti v bunke). Za konštantnej hustoty kvapaliny má táto rovnica tvar :

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

Q_i – prítoky a odtoky z bunky (m^3/s), S_s – špecifická storativita (objem vody uvoľnenej z jednotkového objemu prostredia po znížení hydraulickej výšky o 1m) (1/m), ΔV objem bunky (m^3) a Δh zmena hydraulickej výšky (m) v časovom kroku Δt (s)

Pre takto odvodenú rovnicu platí niekoľko zjednodušení :

Kladná, alebo záporná hodnota toku odpovedá prítoku, alebo odtoku vody do bunky a zo všetkých členov diskkrétnej rovnice je odstránené záporne znamienko vystupujúce v Darcyho pohybovej rovnici. Buď ide o neustálené (transientné) prúdenie : hladina vody v čase kolíše, alebo ustálené (stacionárne) : hladina je v čase konštantná.

KONCEPČNÝ MODEL

Na vytvorenie numerického modelu musíme dopredu poznať základné charakteristiky sledovaného prostredia a miery jeho interakcie s okolím. Ten by mal ďalej obsahovať hydrogeologickú bilanciu vychádzajúcu z dlhodobejších dát, odmerov hladín, dát z literatúry a pod.), analýzu hydraulických charakteristík prostredia, ako aj hlavnú stratigrafiu (vertikálne členenie modelu – stanovenie vrstevnatosti).

Krásny et al. (2012) vo svojej práci poukazuje v „Zastavení 13“ na možné problémy, otázky a činnosti, ktoré sú pri tvorbe konceptu modelu častokrát zanedbávané. Sú to hlavne kvalita a rozsah dát, ich analýza ako aj terénne práce, ktoré sú aj napriek veľkej preskúmanosti územia v rôznych mierkach stále dôležitou a neoddeliteľnou súčasťou zhodnotenia lokality. Ako možný a častý problém potom predkladá z toho vyplývajúcu mierkovú nekompatibilitu medzi reálnou a modelovou situáciou. Potom hydrogeologický model a jeho výstupy výrazne závisia od schopnosti hydrogeológa vhodne schématicizovať, či už priestorovo, alebo anatomicky modelovú situáciu. Numerické modely sa musia opierať o čo najpresnejšie dáta a nevyhnutný racionálny prístup riešiteľa.

Pri príprave a interpretácii koncepčného modelu, ktorý predstavuje zjednodušenú základnú formu obrazu sledovaného územia sa teda javí ako častý problém merítkova nekompatibilita medzi reálnym a modelovým znázornením. V reálnom merítku je prírodné prostredie tvorené celou škálou nehomogenít od rozličnej veľkosti, tvarov, priepustnosti a pod. Je preto nutné čo najlepšie dané prostredie schématicizovať, a to najmä v prostredí s puklinovou, alebo krasovou priepustnosťou nebýva ľahká úloha. Numerické modelovanie sa v celku musí opierať o spoľahlivé vstupné dáta, ich analýzu rovnako ako kritický a racionálny prístup spracovateľa (Krásný et. al., 2012).

VSTUPNÉ DÁTA

Predstavuje ich geometria oblasti (tvar, rozmery, mocnosť vrstiev), hydraulické charakteristiky (hydraulická vodivosť, transmisivita, storativita), okrajové podmienky (kontakt s okolím – hladiny, prítoky, čerpanie, nepriepustné hranice...), počiatočné podmienky (počiatočné hydraulické výšky, počiatočné čerpanie premenné s časom a pod.)

OKRAJOVÉ PODMIENKY (Valentová, 2007)

1.typ – Dirichletova : definovaná konštantná hladina (hydraulická výška) na hranici

$$H = f_1(x, y, z)$$
$$H = f_2(x, y, z, t) \text{ na ploche } S,$$

kde H sú hydraulické výšky; f_1 a f_2 sú známe funkcie. Prvý prípad vyjadruje stacionárnu okrajovú podmienku, druhý prípad potom okrajovú podmienku závislú na čase.

2.typ – Neumannova : definovaný konštantný prietok, na nepriepustnej hranici je teda definovaný prietok $= 0 \text{ m}^3/\text{deň}$

$$v_n = -K \cdot H \cdot x_i \cdot v_i$$

kde $x_i = (x_1, x_2, x_3)$, $v_i = (v_1, v_2, v_3)$ je vektor vonkajšej normály hranice oblasti, H je hodnota hydraulickej výšky vnútri riešenej oblasti (m) a K je hydraulická vodivosť (m/s).

V prípade, kedy by sa jednalo o nepriepustnú hranicu (s nulovým prietokom), určili by sme teda okrajovú podmienku ako $v_n = 0$.

3.typ – Newtonova : kombinovaná okrajová podmienka - prietok pri definovanom odpore, resp. aj danej hydraulickej výške (napr. rieka)

Newtonovu okrajovú podmienku použijeme tam, kde je oblasť prúdenia v kontakte s otvoreným vodným zdrojom, ale je medzi nimi polopriepustná vrstva. Môžeme ju potom vyjadriť ako :

$$v_n = -K \cdot H \cdot x_i \cdot v_i \quad v_n = \frac{H_0 - H_1}{c} \quad c = \frac{B}{K}$$

kde $x_i = (x_1, x_2, x_3)$, $v_i = (v_1, v_2, v_3)$ je vektor vonkajšej normály hranice oblasti, H je hodnota hydraulickej výšky vnútri riešenej oblasti (m), K je hydraulická vodivosť (m/s), c – odpor polopriepustnej vrstvy (s), B – mocnosť kolektoru (m)

POČIATOČNÉ PODMIENKY

Počiatočnú podmienku zavádzame pri časovo-premennom deji, kedy predstavuje hodnotu parametru v čase 0 (na začiatku simulácie), obecný zápis (Valentová, 2007) :

$$H = f(x, y, z, 0)$$

V prípade modelovania prúdenia podzemnej vody z tohto vyplýva, že pre daný bod poznáme hydraulickú výšku v počiatočnom čase $t_0 = 0$, f je známa funkcia.

Programy používané na modelovanie prúdenia podzemných vôd. (Nosek, 2009)

- **MODFLOW (1988)** – U.S. Geological Survey – metóda konečných diferencií, 3D prúdenie

MODFLOW je najrozšírenejší a najpoužívanější nástroj na modelovanie prúdenia kvapaliny cez poréznu oblasť. Vlastný MODFLOW predstavuje iba jednoduchý program bez užívateľského rozhrania, do ktorého sa vstupné dáta zadávajú iba pomocou textových súborov. Nadstavby s užívateľským rozhraním potom ponúkajú rôzne softwarové riešenia : Processing Modflow, GMS, Visual Modflow, Groundwater Vistas atď.

- **MODPATH** - nadstavba pre MODFLOW, umožňuje zobrazit' prúdnicu
- **MT3D (1990,1998)** - nadstavba pre MODFLOW (advekčno - disperzné rovnice), 3D transport látok
- **FEMWATER, FEFLOW** - 3D prúdenie, metóda konečných prvkov.
- **GROUNDWATER VISTAS** - grafické a analytické rozhranie pre vlastné numerické modely

Bruthans a Lanzendorfer (2018) sa v krátkej správe zameriavajú na limity a obmedzenia pre určovanie zdrojov podzemnej vody na prípadoch v Českej republike. V správe kriticky pristupujú k dvom hlavným aspektom numerického modelovania a to : 1.) Interpretáciou výsledku numerického modelu ako unikátnym a jediným riešením pre dané vstupné a okrajové parametre. V jednoduchosti môže byť výstup modelu takmer rovnaký pri značnej zmene parametrov modelu. 2.) Kontrola numerického modelu voči realite. Dáta z reálnych meraní v teréne sú vždy v značne obmedzenom množstve, preto musí byť interpretácia výsledkov v maximálne možnej miere vzhľadom na prevzaté dáta kritická. Z toho plynie záver, že výsledky a výstupy numerického modelu a ich vierohodnosť je plne v réžii kvality a množstva vstupných dát, ako aj analytickým a kritickým prístupom riešiteľa. V práci autori uvádzajú aj dva príklady pri ktorých rôzne zadané vstupné údaje generujú prakticky rovnaký výsledok.

V rámci celkového projektu umelej infiltrácie MŽP bol spracovaný firmou PROGEO s.r.o. (Milický, Uhlík, 2010) aj návrh metodiky modelových riešení na pilotných lokalitách. Ten uvádza, že modelové riešenie prúdenia podzemnej vody je doporučené spracovať na všetkých potencionálne vhodných lokalitách pre umelú infiltráciu, lebo sa jedná o komplexnú metódu hodnotenia záujmového územia pri prevzatí reálnych dát. V poslednej kapitole predkladá aj modelové riešenie prúdenia podzemnej vody na lokalite Káraný.

Medzi hlavné ciele uvádza návrh metodiky modelovania špecifického prípadu umelej infiltrácie autor : simuláciu prúdenia podzemných vôd v prírodných podmienkach a pri rôznych variantách zasakovania, či nabohacovania, a následne aj odberu podzemnej vody. Z rozdielu neovplyvnených a ovplyvnených výsledkov potom určiť mieru hydraulického ovplyvnenia štruktúry. Ďalej stanovenie zásob bilancie vody v štruktúre, smeru prúdenia a zhodnotenie účinnosti variant umelej infiltrácie vo vzťahu k množstvu odberu.

Pri samotnej realizácii modelového riešenia potom rozlišujeme stacionárnu a transientnú simuláciu. Stacionárna pri dlhodobom ustálených podmienkach ukazuje vplyv v dlhodobom časovom merítku, prípadne priemerne ovplyvnenie pomerov prúdenia v štruktúre. Výstupom je jediný stav hladiny a smeru prúdenia podzemnej vody. Transientná forma je volená pri zistení priebehu hladín, prípadne smerov prúdenia v časovej rade vo zvolenej dĺžke časového kroku. Pri stacionárnej simulácii sú obvykle zadané a skalibrované hydraulické parametre (ako napr. K – hydraulická vodivosť...), a pri transientnej potom kapacitné (pórovitosť, storativita...).

9. Program Groundwater Vistas a metóda konečných diferencií

Vlastný hydraulický model MODFLOW je súčasťou softwaru, v ktorom boli vynesené grafické a číselne výsledky v praktickej časti modelovania – Groundwater Vistas (Rumbaugh, 2011) vo verzii 6.96. Tento program teda slúži ako používateľské prostredie pre prevod vstupných dát do modelových algoritmov a pre nasledujúcu interpretáciu výsledkov. Program Groundwater Vistas je grafické rozhranie pre 3D modelovanie prúdenia podzemnej vody a transportu látok. Slúži teda takisto pre prehľadnú vizualizáciu výstupov modelu s širokou škálou analytických nástrojov. Obsahuje viaceré modely, ktorými je možné robiť výpočet.

K výpočtu hladiny v stacionárnom aj tranzientnom modeli bol použitý prúdový model MODFLOW. Tento model je založený na metóde konečných diferencií a vychádza zo základnej rovnice prúdenia cez porézne prostredie uvedenej v predošlom popise numerického modelovania. Rovnice pre prúdenie sú riešene pomocou zadaných vstupných a okrajových parametrov pre každú modelovú bunku. Tie v tomto prípade predstavujú obdĺžniky, prípadne štvorce. Elementy brané do výpočtu majú potom jednu z 3 špecifikácií :

aktívny element (bunka s variabilnou hydraulickou výškou, element s konštantnou hydraulickou výškou, alebo bunky (elementy) ležiace mimo oblasť výpočtu (neaktívne). Tie v našom prípade predstavujú oblasť okolia vymedzeného povodia.

Bunky s konštantnou hydraulickou výškou definujú 1. okrajovú podmienku. Neaktívne potom špeciálny prípad 2. okrajovej podmienky, a variabilnou premennou výškou sú určené bunky 3. okrajovej podmienky (kombinovanej), ktoré predstavujú prítok za definovanej hydraulickej výšky (napr. rieka).

podstata a princíp metódy konečných diferencií (rozdielov) (FDM – Finite Difference Method)

Podstatou metódy je náhrada parciálnych derivácií podľa ich definície diferenciami (rozdielmi). Oblasť, v ktorej hľadáme riešenie, rozdelíme vhodnou sieťou (sieť môže byť aj nerovnomerná).

Princíp metódy (Valentová, 2007) spočíva v nahradení derivácií v riadiacej rovnici konečnými diferenciami. Tato náhrada sa prevádza pomocou Taylorovho rozvoja funkcie v radoch. Pre funkčné hodnoty funkcie f a premennej x v bode $x + \Delta x$ platí :

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{d^2 f}{dx^2} + R$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{df}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{d^2 f}{dx^2} + R$$

kde R je zbytkový člen, ktorého hodnota sa pre $\Delta x \rightarrow 0$ blíží nule. Z týchto dvoch rovníc vyplýva pre náhradu prvej derivácie funkcie $f(x)$ nasledujúci vzťah :

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$

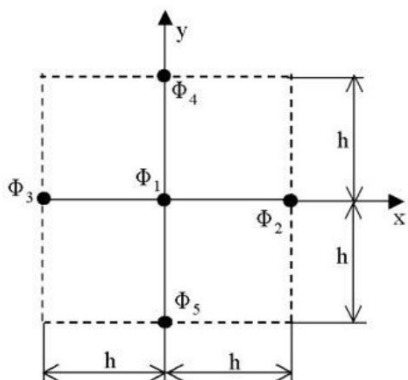
A pre náhradu druhej derivácie potom :

$$\frac{d^2 f}{dx^2} = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

Medzi hlavné výhody tejto metódy patrí jednoduchosť výpočetnej siete a relatívne stabilný a rýchly výpočet. Nevýhodou je neprispôsobenie voči zložitejšiemu ohraničeniu sledovanej oblasti. Používa sa pre ustálené, aj neustálené prúdenie.

Príklad pre štvorcovú sieť

Sú hľadané hodnoty funkcie v uzloch Φ_1 až Φ_5



$$\Phi_2 = \Phi_1 + \frac{\partial \Phi}{\partial x} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} h^2 + \dots,$$

$$\Phi_3 = \Phi_1 - \frac{\partial \Phi}{\partial x} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} h^2 - \dots,$$

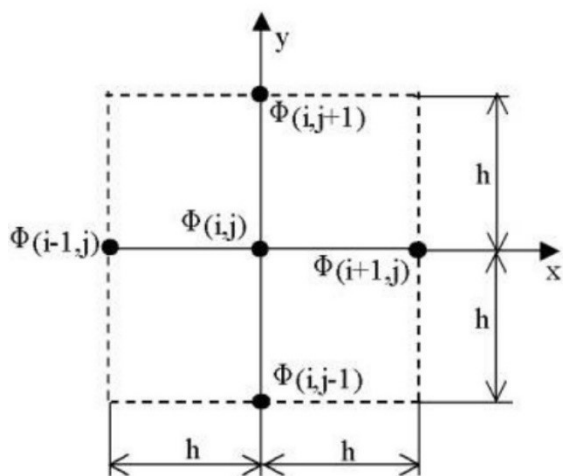
$$\Phi_4 = \Phi_1 + \frac{\partial \Phi}{\partial y} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} h^2 + \dots,$$

$$\Phi_5 = \Phi_1 - \frac{\partial \Phi}{\partial y} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} h^2 - \dots$$

Hodnoty funkcie Φ_1 až Φ_5 vo vyznačených uzloch sa vyjadrujú pomocou Taylorovho rozvoja okolo hodnoty v strednom uzle Φ_1 .

Zostavenie sústavy rovníc potom vyzerá nasledovne –

- zostavenie sústavy rovníc do matic
- pridelenie súradníc jednotlivým uzlom



$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & \cdots & c_{1,N} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & \cdots & c_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & \cdots & \cdots & c_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix},$$

r – príspevok potenciálu

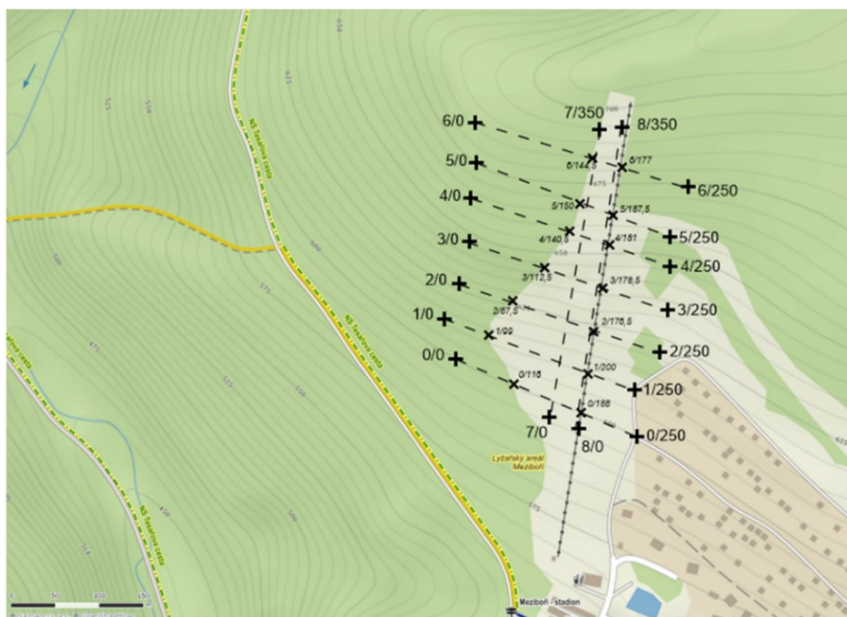
φ – potenciál

Riešenie sústavy rovníc následne prebieha pomocou maticového, alebo iteračného prístupu.

10. Prieskumné práce na lokalite a technický projekt

Na lokalite bola v rámci predbežného prieskumu spravená rada geologických metód, ktorá mala za úlohu čo najpresnejšie objasniť prírodné pomery v blízkosti plánovanej podzemnej hrádze. Zhrnutie jednotlivých metód a ich výsledkov je popísané v ďalších kapitolách.

10.1. Povrchová geofyzika



Obr. 18.: Profily na lokalite pre uskutočnený geofyzikálny prieskum.

Na lokalite bol spravený predbežný geofyzikálny prieskum na posúdenie stavu podložia. Meranie bolo realizované dvoma metódami, a to odporovou tomografiou a metódou seizmickej refrakcie. Odporová tomografia bola spravená na Z-V profiloch s elektródami v rozstupe 2 m a v smere S-J v rozstupe 2,5 m. Metóda seizmickej refrakcie bola použitá iba na profily s párnymi počiatočnými číslami s geofónmi monitorujúcimi odrazené vlny v rozstupe 2,5 m. Vyvolanie seizmického impulzu bolo docielené úderom kladiva o hmotnosti 8kg na silikónovú dosku. Multielektrodové odporové profilovanie ukázalo, že väčšina povrchu je takmer bez kvartérneho pokryvu. Prevedené výsledné hodnoty skutočných merných odporov dosahovali až 15 000 Ωm , čo predstavuje veľmi slabo zvetranú, odolnú horninu. V príľahlej oblasti blokových polí dosahovali hodnoty až niekoľko desiatok-tisíc Ωm . Povrchová geofyzika predstavuje v tomto prípade avšak iba veľmi orientačný pohľad na pomery podložia.

10.2. Vrtný prieskum

Celkovo bolo na lokalite spravených 10 prieskumných jadrových vrtoch, ktoré boli situované v blízkom okolí navrhovanej podzemnej hrádze. Mali objasniť geologické podmienky v blízkosti, a v mieste plánovanej výstavby hrádze, potrebné pre technický projekt, a to najmä hĺbku porušenej puklinovej zóny. Vrty boli realizované do hĺbky 15 metrov. Priemerná mocnosť zvetralinovej zóny, ktorú tvorí pôdny horizont, piesčité až piesčito-ílovité žltohnedé elúvium ortoruly s úlomkami materskej horniny a zvetranou ortorulou je vo vrtoch cca. 3 m. Pod ňou leží potom tektonicky porušená kompaktná svetlo-šedá ortorula. Nepriepustné podložie sa nachádza v hĺbke okolo 10 – 12 metrov pod terénom. Na prieskumných vrtoch boli následne spravené karotážne merania, ktoré mali bližšie špecifikovať hydraulické parametre a hydrogeologické pomery. Zmeraná hladina podzemnej vody poslúžila pre kalibráciu numerického modelu. Situácia prieskumných vrtoch spolu s monitorovacími je v Prílohe 4. Ukážková fotografia a popis vrtného jadra potom na Obr. 6.

10.3. Karotážne merania

Na všetkých prieskumných vrtoch (J1 – J10) boli spravené v období od 31.8. 2017 do 20.9. 2017 firmou Aquatest, a.s. karotážne merania pomocou rôznych metód.

Metódy geofyzikálneho merania vo vrtoch realizované na lokalite sú rezistivimetria v metóde riedenia, ako aj konštantného čerpania označenej kvapaliny (na zistenie aktívnych hydraulických polôh - puklín), gama - gama karotáž v hustotnej modifikácii, kavernometria a indukčná karotáž. Takisto bola zmeraná aj teplota, a pri dvoch vrtoch presný smer prúdenia podzemnej vody. Výsledky sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke, kde Kf – hydraulická vodivosť, hladiny a priepustné polohy sú určené v metroch pod terénom a „E-0X“ predstavuje hodnotu $1 \cdot 10^{-x}$:

vrt	hladina m (20.9.2017)	priepustná poloha (m)	Kf celkovo (m/s)	Kf (priepustné polohy) m/s	prúdenie vody vo vrte l/deň	
J1	2,27	14,9	1,20E-06	3,00E-04	210	hore
J2	5,38	5,38	2,80E-07	5,00E-05	55	dole
J3	6,55	6,8	4,30E-09	6,30E-07	4,5	dole
J4	2,85	3,4 - 3,9 / 5,4	1,30E-07	2,60E-06	130	dole
J5	3,75	3,8 - 4,3 / 9,2 / 13,7	9,00E-05	9,00E-04	410/900	dole/hore
J6	5,47	5,8 - 6,15 / 8,6 / 10,25	1,95E-05	2,90E-05	770	dole
J7	5,31	10,8 - 11,5	3,90E-05	6,70E-05	30	dole
J8	5,03	5,9 - 6,15 / 7,7	4,10E-07	8,50E-07	2	dole
J9	3,17	8,8 - 9,2	1,60E-05	1,90E-05	300/300	hore/dole
J10	7,7	7,7 - 9,15	4,70E-06	9,00E-06	40	dole

Tab. 2.: Tabuľka výsledkov karotážnych meraní na lokalite.

Konduktivita (merná vodivosť) bola vo všetkých vrtoch obdobná a dosahovala hodnôt 130-200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Teplota bola podľa očakávania vyššia na povrchu hladiny ako pri dne a to o 1 až 2 °C. (na konci augusta 12,5 °C pri povrchu)

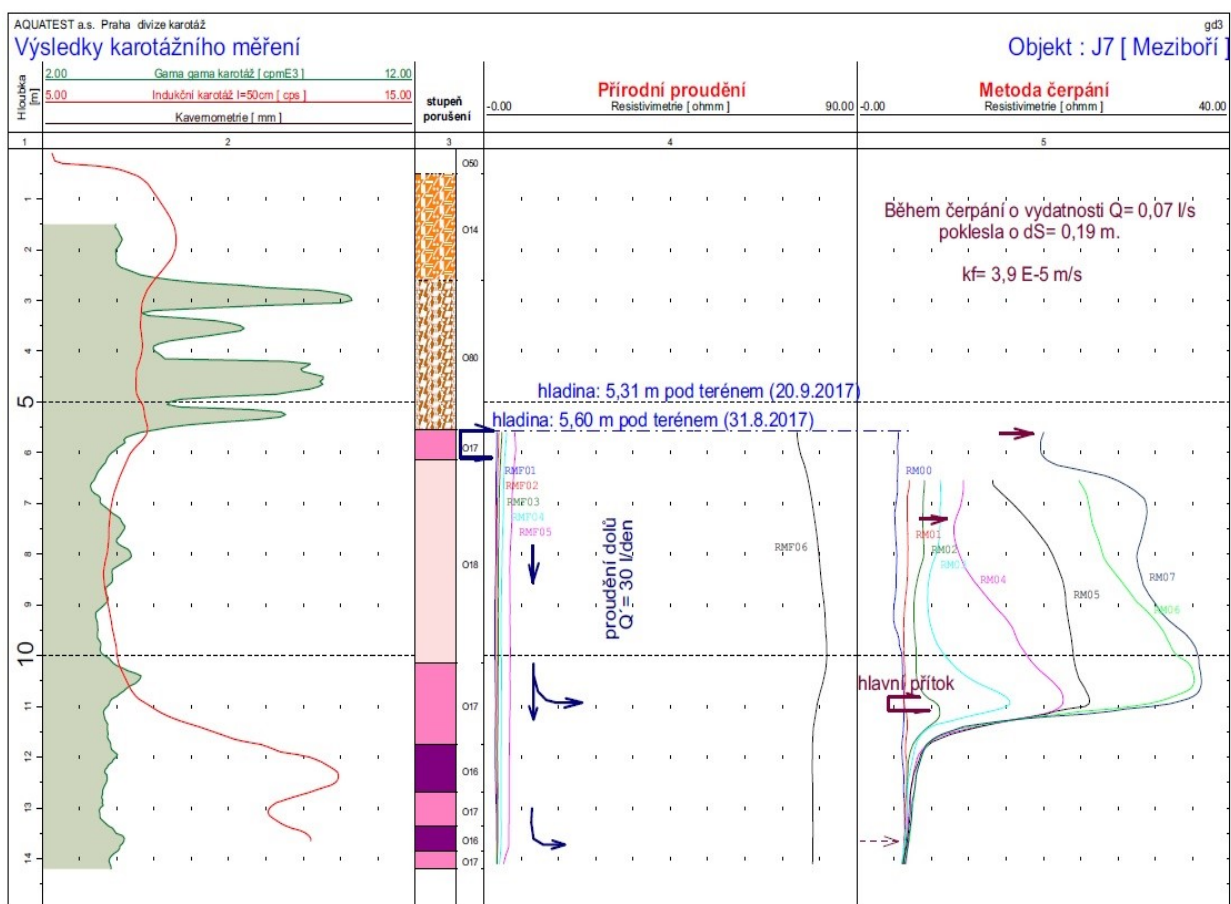
Podľa karotážnej správy a z priebehu výšky hladín nemožno interpolovať závislosť medzi pozíciou vrtu (jeho nadmorskou výškou) a hladinou podzemnej vody. Situačná mapa prieskumných vrtoch v Prílohe 4. Výška hladín vo vrtoch je výsledkom prepojenia niektorých priepustných puklín a ich vzájomného prepojenia v rozpukanej zóne hydrogeologického masívu. Nerovnomernosť hladín dokazuje aj neďaleký výver prameňa cca. 15 m po vrstevnici od vrtu J3, v ktorom je hladina podzemnej vody zhruba 7 m pod povrchom.

Po prvom meraní v dobe sucha a následnom meraní po zrážkových úhrnoch vody vzrástla hladina podzemnej vody vo všetkých vrtoch v rádoch desiatok cm až prvého metra.

Ako sa uvádza v záverečnej správe : „Je až prekvapivé, že na obmedzenom priestore, na ktorom boli vrty vyhlbené, teda na ploche zhruba 20 x 40 m, je každý vrt svojim spôsobom z hľadiska hydrogeologického unikátny.“

Karotážne merania poukázali na značne heterogénny charakter kryštalinika a jeho rozpukanej zóny v malom merítku, ktorú predstavuje plocha 20 x 40 m. Prakticky každý vrt vykazoval odlišné hĺbky priepustných polôh, ako aj mieru ich priepustnosti. Najintenzívnejšie prirodzené prúdenie bolo zistené vo vrte J5 (až 900 l/deň) a dosahoval aj najvyššiu hodnotu koeficientu filtrácie $9 \cdot 10^{-4}$ m/s. Koeficienty filtrácie sa od seba líšia pri jednotlivých vrtoch aj o 2 až 3 rady.

Vo vrtoch prevláda zostupné vertikálne prúdenie, čo je v súlade s oblasťou kde prevláda infiltrácia. V dvoch vrtoch bola ale zistená aj horizontálna zložka prúdenia, a to vo vrtoch J5 (v hĺbke 9,3 m) a J9 (v hĺbke 9,0 m). V týchto vrtoch bol zmeraný celkový smer prúdenia podzemnej vody a ten je prakticky totožný so smerom sklonu svahu.



Obr. 19.: Ukážka výstupu karotážneho merania na vrte J7.

10.4. Technický a stavebný projekt

Pôvodný návrh technického riešenia z roku 2010 v správe od Aquatestu, a.s. predkladal hrubý odhad parametrov tesniacej hrádze a drenážneho systému. Uvádza vybudovanie tesniacej clony v dolnej časti zjazdovky v dĺžke cca. 140 m. Pred ňou bude na návodnej strane vybudovaná sústava zberných drénov na odvod a reguláciu zadržanej vody do čerpacej studne. Odtiaľ bude voda odvádzaná prepadovým potrubím do akumulčných nádrží nad futbalovým ihriskom, ktoré budú opatrené bezpečnostným prelivom do Bílého potoka.

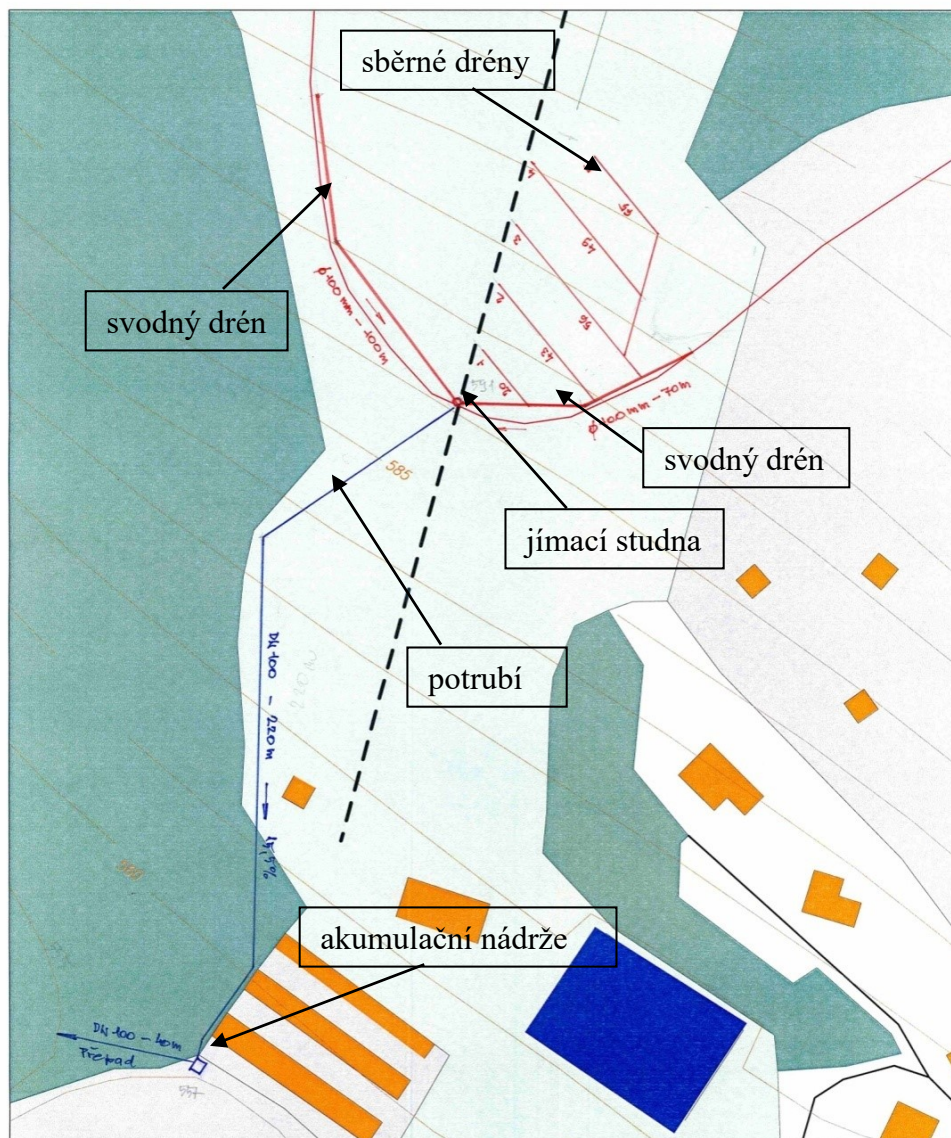
Samotný podrobnejší návrh technického riešenia, ktorú obstarala firma Šindlar, s.r.o. predkladá 2 možné varianty. Tie detailnejšie popisujú konštrukciu a orientáciu tesniacej clony, ktorá má v oboch prípadoch oblúkový tvar. Pri prvej variante je dĺžka tesniacej clony 107 m a pri druhej potom 122 m. V oboch prípadoch je niveleta koruny clony už 0,2 m pod terénom v najnižšom mieste pozdĺžneho profilu. Konštrukcia clony bude zhotovená pomocou injektáže do

hlĺbky 12 m od terénu a na ňu bude nadväzovať ťelezobetónová stena. Pri injektáži sa počíta s 2 vrtmi na 1 m podzemnej tesniacej clony.

Pre zvýšenie objemu zadržanej vody potom návrh podsúva možnosť vyplnenia návodnej strany clony zeminou s veľkým objemom pórov, alebo kamenivom pri variante s otvoreným výkopom.

Pri oboch variantách je uvažovaný drén pre odvádzanie zadržanej vody, ktorú by mala predstavovať revízna, prefabrikovaná, na návodnej strane perforovaná šachta, a v nej potom povedie samotné potrubie, ktoré povedie cez tesniacu clonu do kontrolnej šachty na vzdušnej strane a bude pokračovať do spádového koryta na východnej časti svahu. Pre prípadné zníženie hladiny je v návrhu aj druhé potrubie, ktoré v prípade nadmerných objemov vody v akumulačnom priestore reguluje hladinu pod povrchom. Potrubie bude zakončené posúvačom.

Najnovší návrh technického riešenia firmy Šindlar, s.r.o. z konca júla 2019, ktorý bol použitý aj pre numerický model vychádza z pôvodnej prvej varianty a je doplnený o niekoľko nových, prídavných prvkov. Celková dĺžka podzemnej hrádze bude teda 107 m a niveleta jej koruny v najnižšom mieste 0,2 m pod povrchom terénu. Hrádza bude vybudovaná pomocou injektáže cemento - betónovej zmesi. Stredná časť hrádze bude injektovaná z otvoreného výkopu (v celkovej dĺžke 47 m) a okrajové časti potom z povrchu terénu (okraje od strednej časti 22 m + 38 m). Výkop bude následne zatesnený ílovo-cementovou zmesou. Prvky dopĺňujúce a riešené v novom technickom návrhu sú najmä akumulačná nádrž so štrkovým obsypom, malá revízna šachta na závodnej strane hrádze, v ktorej bude regulovateľný drenážny vývod vedúci cez teleso hrádze z návodnej strany (akumulačnej nádrže). Ako podporné prvky infiltrácie sú potom navrhované dve infiltračné ryhy vyplnené hrubozrnným štrkom. Situácia najnovšieho technického projektu vrátane profilu je v Prílohách 5, 6 a 7. Správa potom predkladá aj cenovú reláciu jednotlivých technických postupov, z ktorých najvýhodnejšie vychádzajú varianty kompletnej injektáže z terénu (11 920 000 korún českých), alebo s prevedením injektážnej clony z otvoreného výkopu popísaného vyššie (12 215 780 – 12 132 030 korún českých), ktorá je vyššia vzhľadom na množstvo zemných prác, ale malý rozdiel v cene oproti prvej variante je daný zavedením injektovanej clony do menšej hlĺbky od povrchu.



LEGENDA:
 — vodní toky
 ■ vodní díla
 ■ louka
 ■ les
 ■ budovy
 — ulice
 - - lyžařský vlek
 — vrstevnice
 — hranice k.ú.

— zájmové povodí
 sběrné drény Ø150mm, celková 233m

Zdroj: ZABAGED



Obr. 20.: Prvotný návrh technického riešenia od firmy Aquatest a.s. (2010).

11. Zhrnutie časovo - premenných dát na lokalite

Z predbežného prieskumu a dostupných údajov sa zdá byť prostredie sledovanej oblasti z hydrogeologického pohľadu značne variabilné, a to aj v celkom malom neregionálnom merítku. Prúdenie vody vykazuje na malom území rozdielny charakter a je zjavne ovplyvnené viacerými faktormi, ktoré sa následne riešený numerický model nemajú pridanú váhu, ako najmä usporiadanie, orientácia priepustných puklín a preferenčné cesty prúdenia.

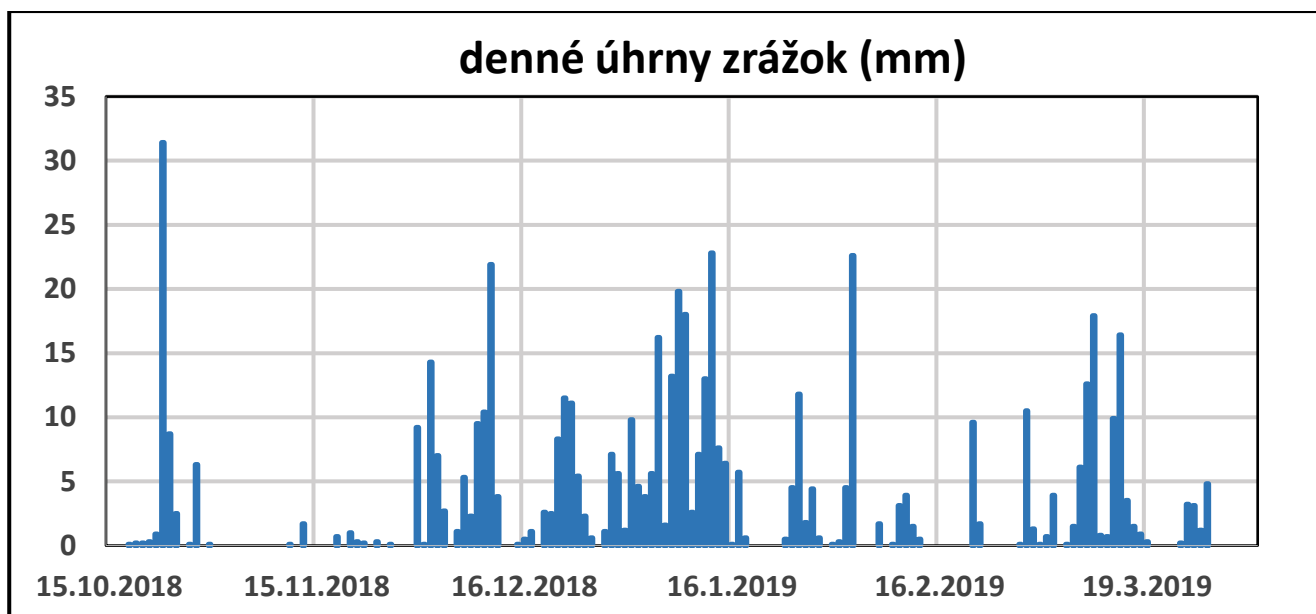
11.1. Dáta zo 4 monitorovacích vrtov

Na lokalite boli zriadené 4 monitorovacie vrty osadené datalogrami s denným zápisom výšky hladiny podzemnej vody. Monitorovacie vrty ostávajú na lokalite aj v priebehu a po vybudovaní podzemnej hrádze s prípadnými pomocnými objektami. Tie budú teda priamo sledovať efektívnosť konštrukcie. Dva z nich sú preto umiestnené pod plánovanou osou hrádze, nižšie po svahu na závodnej strane, a dva nad plánovanou osou hrádze na návodnej strane, teda v akumuláčnej oblasti. Z priebehu hladín podzemnej vody v prírodných podmienkach bol zvolený ako reprezentatívny priebeh hladiny vo vrte M3. Vo všetkých vrtoch je viac-menej rovnaké kolísanie hladín.

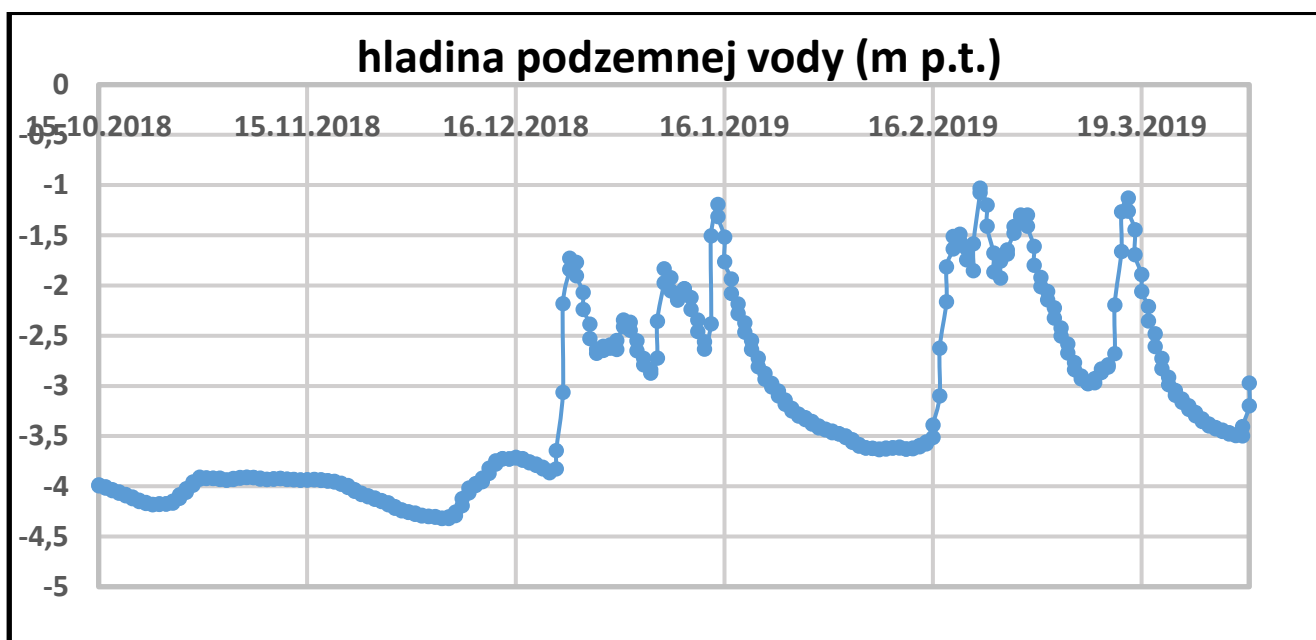
11.2. Porovnanie zrážok s hladinami podzemnej vody na lokalite

V grafoch na nasledujúcej strane sú vynesené zrážkové údaje a údaje hladín podzemnej vody vo vrte „M3“, ktoré predstavujú obdobie od 15.10.2018 do 4.4.2019. Za celý rok 2018 dosahovali zrážky na vybranej stanici v blízkosti sledovaného územia hodnotu 743,9. Táto hodnota bola najvyššie meraná spomedzi staníc v celom Ústeckom kraji.

Výrazný nárast hladiny možno sledovať na konci roku 2018, kedy hladina skokovo vzrástla za 3 dni o viac ako 2 metre. Následne na prelome rokov 2018/2019 je v súlade z vysokými zrážkovými úhrnmi aj hladina podzemnej vody. Obdobie bohaté na dotáciu zvodne potom končí v strede januára (15.1.2019) a nasleduje takmer mesačná odvodňovacia regresia krivky. Vysoké, nárazové zrážky sa zjavne na priebehu podzemnej vody neodrážajú (ako napr. zrážková udalosť 3.2.2019), čo možno vysvetliť veľkým povrchovým a hypodermickým odtokom zo svažitých oblastí kryštalinika.



Graf 3.: Priebeh denných úhrnov zrážok v rozmedzí od 15.10.2018 do 4.4.2019.



Graf 4.: Priebeh hladín podzemnej vody (m od terénu) v rozmedzí od 15.10.2018 do 4.4.2019.

12. Numerický model v programe Groundwater Vistas

Pre zhodnotenie a približný predpoklad účinku hrádze na režim podzemnej vody bol použitý numerický trojrozmerný model MODFLOW. Ten vychádza z výpočetnej siete rovnobežníkov (v našom prípade štvorcov) a diferenciálne rovnice sú v ňom riešené pomocou metódy „konečných diferencií“ („finite differences“) – využívajúcu teda pravouhlú sieť. Program Groundwater Vistas slúži ako používateľské prostredie niekoľko vlastných numerických modelov vrátane MODFLOW.

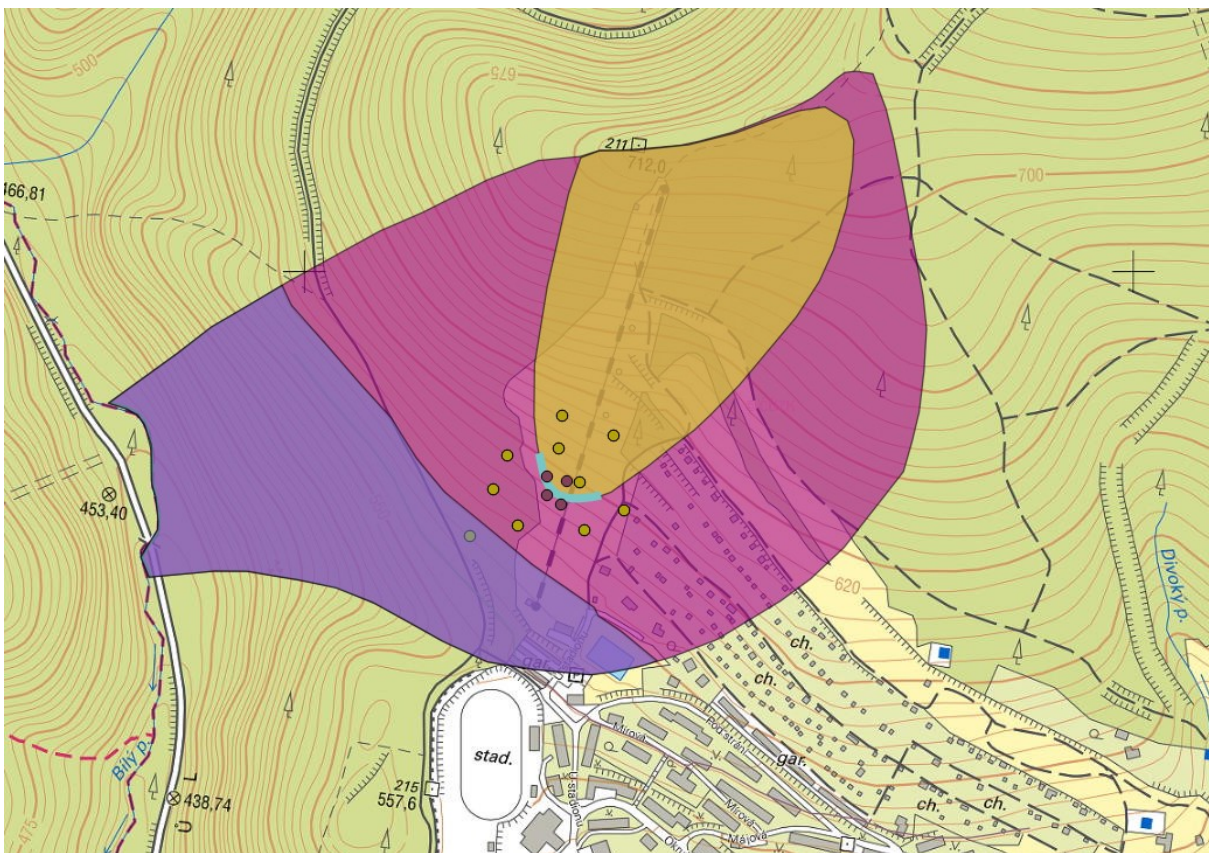
12.1. 1. Varianta ohraničenia povodia.

Nasledujúci text predkladá pôvodne zamýšľané ohraničenie povodia. V priebehu práce bolo prístupné k vhodnejšiemu ohraničeniu nakoľko v prvej, začiatkovej variante vykazovali izolínie podzemnej vody v južnej a západnej časti modelu vysoké, anomálne hodnoty. Nižšie je v ďalších kapitolách popísaný chronologický postup práce na modeli.

12.1.1. Vymedzenie plochy povodia

Plocha záujmového povodia bola vymedzená vzhľadom na veľkosť samotnej hrádze a priebeh zastavanej oblasti obce Meziboří v čo najmenšom možnom rozsahu a drenážnu oblasť predstavuje v prvej variante strmý zráz k Bílému potoku. Pre vymedzenie územia povodia bola použitá funkcia vytvorenia polygónu do „shapefile“ súboru v programe Surfer, a to pre celkovo dve varianty : pre oblasť ohraničenú z juhu zastavanou časťou, a na západe údolným dnom Bílého potoka. V neskoršej fázy práce potom vhodnejšou variantou, ako sa ukáže v kapitole 12.2. : pre oblasť ohraničenú na spodnej časti svahu hranicou vedenou na vrstevnici. Vymedzenie vhodného povodia pre model v prvej variante, do ktorého bol zahrnutý Bílý potok bolo značne limitované morfológickou nerovnomernosťou terénu a zastavanou plochou, ktorá prispieva k umelej drenáži a teda vyššiemu (rýchlejšiemu) odtoku z krajiny. Samotné povodie je zo západu ohraničené Bílým potokom a nastavená hydraulická výška, ktorá korešponduje s jeho nadmorskou výškou v tejto časti. Toto povodie je však značne skreslené vzhľadom na použitú okrajovú podmienku nulového prietoku za hranicou povodia, a to vo východnej a juhovýchodnej časti na hranici so zastavaným územím obce Meziboří.

Pri tejto variante sa teda vychádzalo z okrajovej podmienky stálej hladiny (hydraulickej výšky), ktorú predstavuje vodný tok. Stav hladiny, resp. prietok sa samozrejme v závislosti na čase môže viac, či menej meniť, ale pre model v stacionárnom režime a jednoduchosť bola nastavená konštantná hydraulická výška, keďže neboli k dispozícii žiadne dostupné dáta z výšky toku, alebo meranie prietoku na profile v blízkosti povodia, a tým by mohla byť použitá kombinovaná okrajová podmienka. Na samotnom ohraničení povodia je potom zjednodušená iba južná hranica infiltračnej časti pri chatovej oblasti obce Meziboří, čo vo výsledku, ako je komentované v kap. 12.1.5. prestavovalo pre model značný problém vo vykreslení správnych izolínií podzemnej vody.



Obr. 21.: Vymedzenie povodia 1. varianty s vyznačenou drenážnou oblasťou (fialová), uzáverovým povodím hrádze (žltá) a telesom hrádze s kalibračnými bodmi (4 monitorovacie vrty M1-M4 (červené) + pomocné kalibračné body v blízkosti hrádze (žlté)).

Hranica povodia je vedené z hrebeňa vrchu Strelná od nadmorskej výšky 720 m n.m. a následne po predpokladaných rozvodniciach a spádnicach (kolmo na vrstevnice) do údolia Bílého potoka s výnimkou zjednodušenia na východnej / juhovýchodnej časti. Veľkosť plochy povodia a teda aktívnej oblasti modelu je v tomto prípade približne 0,476 km².

12.1.2. Modelová sieť, vstupné parametre a morfológia

Model je koncipovaný ako trojvrstevný, stacionárny. Modelovú sieť v programe Groundwater Vistas tvoria rovnobežníky, ktoré v tomto prípade predstavujú štvorce s rozmermi 10 x 10 m. Na úvod sa v programe Groundwater Vistas vytvorila hrubá sieť, v ktorej boli nastavené približné parametre oblasti modelu. V tomto prípade sa zadala sieť (grid) s rozmermi 1000 m x 1000 m s výpočtovými elementami (bunkami), ktoré teda predstavujú štvorce o strane 10 m. Celková plocha základnej oblasti je vo výsledku 1km². Do úvodného nastavenia je taktiež dôležité zadať počet vrstiev – v našom prípade 3. Model ma prednastavenú mocnosť 100 m, ktorá bola nechaná bez zmeny takisto ako ostatné parametre, ktoré sa upravovali v ďalšom priebehu.

Horizontal Model Grid				Vertical Model Grid	
Number of Rows	100			Number of Layers	3
Number of Columns	100			Model Bottom Elevation	0
Uniform X Spacing	10			Model Top Elevation	100
Uniform Y Spacing	10			<input type="checkbox"/> Layers are flat	Layer Elevations

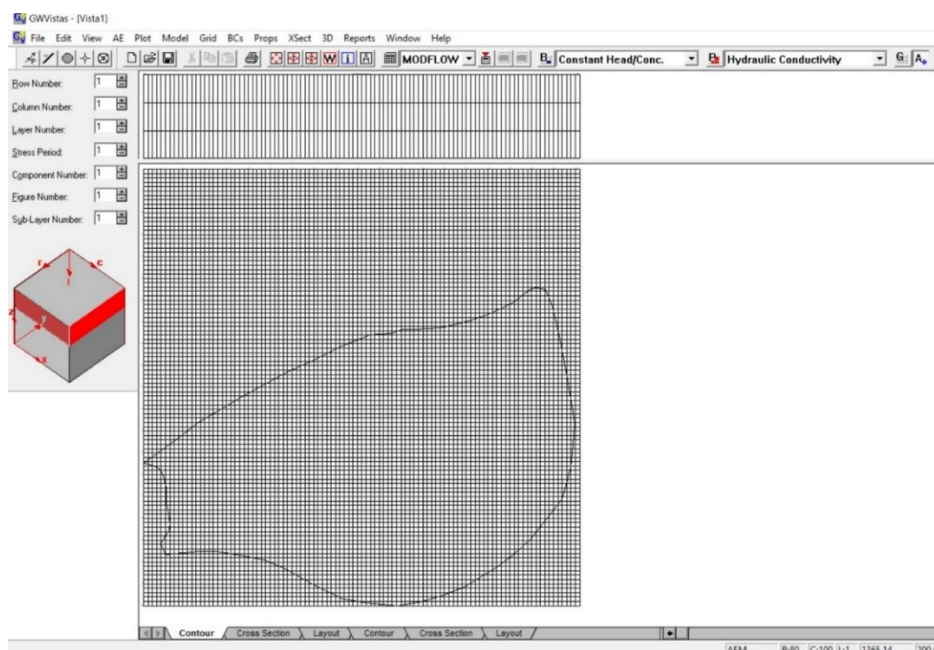
Default Parameter Values						No. Zones	
K	Kx	1	Ky	1	Kz	1	10
Storage	S	0.01	Sy	0.01	Porosity	0.01	10
Leakance		0.01					10
Recharge	Rate	0	Conc.	0			10
ET	Rate	0	Extinction	0			10
Dispersivity	Long.	0	Transverse	0	Vertical	0	10
Sorption	Kd	0	Density	157			10
Initial Conc.		0					10

Maximum Stress Periods	1	Start with Stress Period	1	Read Every	1	Stress Periods
World Coordinates of Model Origin	X	0	Y	0	Rotation	0

MODFLOW... EVS... TMR... OK Cancel

Obr. 22.: Prvotné nastavenie gridu a parametrov v programe.

Po vytvorení hraničnej oblasti povodia v programe QGIS a importovaní súboru „shapefile“ do vytvoreného gridu v programe Groundwater Vistas boli upravené rozmery gridu na veľkosť povodia a pre bunky okolo povodia zadaná vo všetkých troch vrstvách okrajová podmienka „No-flow“, teda vonkajšie bunky sú brané ako neaktívne, a cez hranicu povodia je nulový prietok. Výsledné rozmery výpočtovej siete sú potom 990 m x 730 m (99 x 73 buniek).



Obr. 23.: Prostredie programu Groundwater Vistas s počiatčným gridom modelu a ohraničením oblasti.

V ďalšom kroku boli zadané vstupné parametre modelu. Keďže program počíta všetky hodnoty na rovnaké základné jednotky, resp. ich ekvivalenty pri rôznych parametroch, tak v nastaveniach hydraulickej vodivosti boli zadané pre každú vrstvu hydraulické vodivosti (K) v jednotkách $\text{m} \cdot \text{deň}^{-1}$. To isté platí pre zrážky, ktoré boli zadané vo vrchnej vrstve v jednotkách $\text{m} \cdot \text{deň}^{-1}$.

Vstupné parametre pre model tvoria v počiatčnej fázy pred kalibráciou vhodne nastavené hodnoty hydraulickej vodivosti (K), ktoré sa čo najviac blížila realite. Pre tento krok boli zvolené hodnoty 5 m/deň v najvrchnejšej (zvetralinovej) vrstve, $0,26 \text{ m/deň}$ v druhej priepustnej vrstve a zanedbateľná priepustnosť v podloží $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/deň}$. Pre pripovrchovú zónu bola priradená hodnota o rád vyššia ako v 2. vrstve kolektoru, ktorá spadá do približného rozmedzia pre zvetraliny a podrtené, nespevnené sedimenty kryštalinika (elúvium). V druhej, puklinovej zóne bola nastavená priemerná hodnota hydraulickej vodivosti z výsledkov karotáže v prieskumných vrtoch (viď. kapitola 10.3.). Pre spodnú, nepriepustnú vrstvu bola nastavená zanedbateľná priepustnosť, keďže program následne lepšie pracuje pri nasýtenej podložnej vrstve a dosahuje uspokojivejšie výsledky, a taktiež je v prostredí hydrogeologického masívu možný predpoklad hlbšie zasahujúcich prepojených zlomov, teda je tu minimálna hydraulická vodivosť. Na začiatok boli zadané rovnaké vstupné hydraulické vodivosti v horizontálnom (K_x , K_y), aj vertikálnom

smere (K_z). Počas kalibrácie modelu 1. varianty bola rozdelená oblasť na infiltračnú a drenážnu časť. Pre drenážnu potom bola zadaná vstupná hodnota „ K “ pre vrchné dve vrstvy 2 – krát vyššia ako v infiltračnej časti.

Modelová vrstva	Zaradenie v rámci hydrogeologického masívu	Mocnosť (m)	Vstupné K_x/K_y (m/s)	Vstupné K_z (m/s)
1	zvetralinová zóna	3	$5,79 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$
2	puklinová zóna	9	$3,01 \cdot 10^{-6}$	$3,01 \cdot 10^{-6}$
3	nepriepustné podložie	20	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$
1a	drenážna oblasť 1. vrstvy	3	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$
2a	drenážna oblasť 2. vrstvy	9	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$6,02 \cdot 10^{-6}$

Tab. 3.: Prehľad vstupných hodnôt hydraulických vodivosti 1. varianty.

Ďalším vstupným údajom pre model je zadanie zrážkových úhrnov. Pre tento parameter boli použité ročné namerané zrážky na stanici ČHMÚ „Klíny“, ktorá je vzdialená od záujmovej oblasti cca. 2,5 km severo-západným smerom a leží v nadmorskej výške 807 m n.m. Zrážky na tejto stanici dosiahli v roku 2018 najvyššiu nameranú hodnotu v rámci Ústeckého kraja a to 743,9 mm. Z tohto údaja bol následne prepočítaný denný priemer zrážok a stiahnutý na hodnotu efektívnej infiltrácie, ktorá v tomto prípade predstavuje 10% z celkových zrážok. Táto hodnota je v súlade s hrubým dlhodobým podielom odtoku podzemnej vody a zrážok v oblasti krušných hôr okolia Litvínova (Krásný, Kněžek, 1982). Efektívna infiltrácia predstavuje množstvo vody zo zrážkových úhrnov, ktoré doplní podzemné zdroje vody teda dosiahne jej hladinu. Závisí teda na miere evapotranspirácie, povrchového a hypodermického odtoku. Takto prepočítaný údaj (v tabuľke nižšie) sa potom zadal do parametrov modelu v metroch za deň (Recharge).

Q – zrážky				efektívna infiltrácia (m/deň)
Klíny	mm/rok	mm/deň	m/deň	10 % z celkových zrážok
2018	743,9	2,04	0,00204	0,000204

Tab. 4.: Údaje zrážkového úhrnu a prepočet na jej efektívnu hodnotu.

Pre ďalšiu prácu s modelom bolo nevyhnutné nastaviť resp. importovať morfológiu terénu a podložných vrstiev. Strop prvej vrstvy tvorí reliéf terénu a bázy jednotlivých vrstiev sú potom jeho priemetom v určených hĺbkach (mocnostiach). Pre tento účel sa musí pracovať s digitálnym modelom reliéfu (DEM). Z neho bol stiahnutý výrez s číselnými dátami o nadmorských výškach, ktoré tvoria rovnomernú sieť. Následne bol upravený do vhodnej podoby, ktorá predstavuje textový súbor s výškami, a v jeho hlavičke údajmi o veľkosti gridu a súradnicami v počiatočnom bode oblasti, ktoré sa prepisujú podľa nastavenia v programe Groundwater Vistas. V ďalšej fázy, z textového súboru bola pomocou programu Surfer vytvorená mapa kontúr nadmorských výšok a uložená vo formáte .grd (Surfer Grid), ktorý sa dá importovať do programu Groundwater Vistas. Takto vytvorená morfológia bola priradená k hornej hranici prvej vrstvy (povrchu modelu), a následne pomocou nástroja „Matrix Editor“ boli skopírované nadmorské výšky do dvoch vrstiev a odčítali sa od nich priradené mocnosti pre každú vrstvu zvlášť. V našom trojvrstevnom modeli bola v tomto prípade zvolená mocnosť prvej vrstvy 3 m, mocnosť druhej vrstvy 9 m, a tretia, ktorá predstavuje nepriepustné podložie má mocnosť 20 m. Reliéf podložia teda kopíruje terén. Mocnosti jednotlivých vrstiev vychádzajú z technického riešenia hrádze, ktorá má siahať do hĺbky približne 12 metrov pod terénom a je uvádzaná ako hranica nepriepustného podložia. Tento záver vychádzal najmä z 10 prieskumných jadrových vrtov, z ktorých bola odvodená aj mocnosť vrchnej zvetralinovej vrstvy.

12.1.3. Okrajové podmienky modelu

Na všetkých vonkajších bunkách okolo hranice povodia bola nastavená okrajová podmienka nulového prietoku - 2. typu (Neumanová), teda konštantný prietok = 0 m³/deň. Tým sa tieto bunky v programe „deaktivujú“ a tvoria nepriepustnú hranicu pre výpočet priebehu hladín v modeli.

V prírodnom neovplyvnenom (ustálenom) režime modelu bez telesa hrádze bola zadaná okrajová podmienka 1. typu (Dirichletova), ktorá udáva nemennú hydraulickú výšku na určenom okraji povodia. V prvej variante išlo o hladinu Bílého potoka, ktorá leží podľa morfolologickej mapy v nadmorskej výške 450 m n.m. Takto je model pripravený na prvotný výpočet a následnú kalibráciu.

12.1.4. Kalibrácia modelu

Kalibráciou modelu sa rozumie upravovanie vstupných parametrov a nastavení modelu tak, aby sa dosiahlo čo najpresnejšieho výstupu v podobe vykreslenia izolínií podzemnej vody a objemovej bilancie modelu, ktoré sa pokiaľ možno čo najviac blížila skutočnosti.

Po počiatkových neúspechoch s ručnými zmenami hydraulických vodivostí a nastavením parametrov modelu, prvú a zásadnú zmenu priniesla zmena solvera („riešiteľa“) z prednastaveného PCG2 - „Preconditioned Conjugate-Gradient2“ na SOR – „Successive Over-Relaxation“.

SOR SOLVER

Iteračná metóda SOR (Successive Over-Relaxation), metóda postupnej relaxácie, je v numerickej lineárnej algebre variantou Gauss-Seidelovej metódy na riešenie lineárneho systému rovníc, ktorá vedie k rýchlejšej konvergencii (zblížovaniu radov). Oproti nej využíva vhodný súčinný koeficient. Podobná metóda sa môže použiť na akýkoľvek pomaly sa konvergujúci iteračný proces. Bola navrhnutá v roku 1950 v súčasných prácach od Davida M. Younga Jr. a Stanleyho P. Frankela za účelom automatického riešenia lineárnych systémov na pomaly sa rozmáhajúcich digitálnych počítačoch. Metódy Over-Relaxation boli použité už predtým, avšak na výpočet s pomocou ľudských „kalkulačiek“, teda so zásahom odborných znalostí daného riešiteľa a jeho kritického myslenia. To ich robilo nepoužiteľnými pre programovanie na počítačoch. Tieto rozdielne aspekty sú diskutované v práci Younga (1950). Spolu s riešiteľom „SIP“ (Strongly Implicit Procedure) je jedným z pôvodných riešiteľov v MODFLOW. Medzi ďalšie nové potom patria PCG2 (Preconditioned Conjugate Gradient 2), PCGN (Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control), GMG (Geometric Multigrid).

Následne sa ručne menili nastavenia samotného modelu a riešiteľa tak, aby sa dosiahol čo najlepší výsledok pred samotnou kalibráciou pomocou kalibračných bodov. Ten sa sledoval najskôr na úrovni hladiny podzemnej vody a celkovej bilancie modelu, resp. jej percentuálnej chyby (v ustálenom – stacionárnom režime by mal byť objem vstupu a výstupu vody ideálne zhodný). Po dosiahnutí uspokojivého výsledku sa pristúpilo na zadanie kalibračných bodov (v programe : „Targets“), v ktorých bola zadefinovaná meraná, a v pomocných kalibračných bodoch predpokladaná hydraulická výška.

Kalibračné body

Do modelu sa teda zadali kalibračné body, ktoré majú danú hydraulickú výšku, a na ktoré sa model bude kalibrovať.

Z dostupných bodových údajov hladín podzemnej vody, ktoré spadajú do vymedzeného povodia boli vybrané najmä 4 monitorovacie vrty, na ktorých stále prebieha /august, 2019/ konštantné meranie hladín podzemnej vody a potom aj údajov hladiny podzemnej vody (HPV) z 10 prieskumných vrtov v blízkom okolí plánovanej hrádze. Tieto dáta boli pre model v ustálenom režime spriemerované a nanosené do modelu ako kalibračné body s údajom o HPV, podľa ktorých sa potom porovnávala nasimulovaná hladina. Z iných, archívnych a verejne dostupných zdrojov neboli zistené žiadne ďalšie vrty s informáciami o výške HPV spadajúce do vymedzených oblastí povodia 1. aj 2. varianty.

Tieto body však v rámci povodia ležia veľmi blízko pri sebe a teda na relatívne malej ploche. Preto sa pristúpilo v priebehu kalibrácie aj na pomocné kalibračné body, ktorých hydraulická výška bola umelo nastavená 5 m pod terénom, a tie boli rozmiestnené v potrebných miestach vo väčšej vzdialenosti od hrádze, aby priebeh hladiny v celom povodí bol pod povrchom terénu. Hladina nastavená v týchto bodoch, 5 metrov pod terénom, viac-menej korešponduje s priemernou výškou hladiny podzemnej vody v dokumentovaných vrtoch.

vrt	dátum/obdobie merania hladiny			m pod terénom	nadm. výška vrtu	hydraulická výška
	31.8.2017	20.9.2017	18.9.2018	priemer	m n.m.	m n.m.
J1		2,27	2,5	2,39	595,12	592,73
J2		5,38	4,8	5,09	594,04	588,95
J3	7,7	6,55	4,9	6,38	593,41	587,03
J4	3,25	2,85	2,4	2,83	595,34	592,51
J5	3,83	3,75	2,7	3,43	596,56	593,13
J6	5,77	5,47	5,1	5,45	598,71	593,26
J7	5,6	5,31	4,9	5,27	598,13	592,86
J8	5,31	5,03	6,1	5,48	597,74	592,26
J9	3,37	3,17	2,9	3,15	595,91	592,76
J10	7,95	7,7	7,3	7,65	601,04	593,39
	denný monitoring 4.12.2017 - 4.4.2019					
M1	priemer :	9,51		9,51	592,99	583,48
M2	m	3,50		3,50	592,64	589,14
M3	pod terénom	3,38		3,38	596,15	592,77
M4		3,43		3,43	598,07	594,64

Tab. 5.: Súhrnná tabuľka kalibračných bodov, ktoré predstavujú priamo merané vrty (pre jednotlivé varianty boli potom použité pomocné kalibračné body).

V programe je potom viacero kalibračných nástrojov. V tomto prípade bola v prvom kroku použitá automatická kalibrácia priamo v programe Groundwater Vistas bez nutnosti zadávať a pracovať s externými súbormi. Následne sa pristúpilo k senzitívnej analýze, do ktorej sa zadávajú parametre, ktoré ručne meníme. Z jej výsledku potom dostaneme graf, ktorý poukazuje na veľkosť zmeny hydraulickéj výšky so zmenou určitého parametra. V tomto prípade boli teda parametre pre senzitívnu analýzu hydraulické vodivosti pre 1. a 2. vrstvu vo všetkých smeroch (K_x , K_y , K_z).

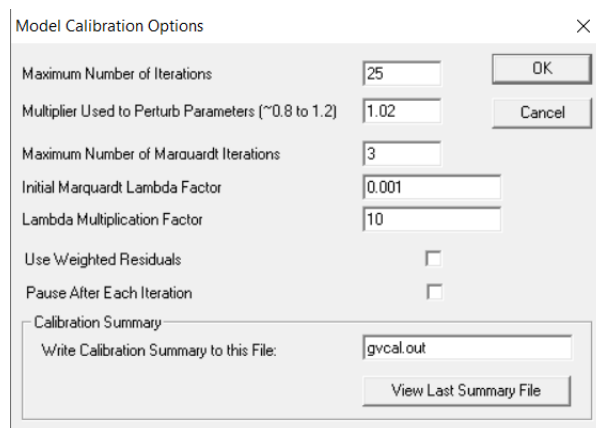
AUTOMATICKÁ KALIBRÁCIA PROGRAMU GV

V programe Groundwater Vistas sa nachádza automatický, jednoduchý kalibračný nástroj, ktorý je pre tieto účely a vzhľadom na rozsah kalibračných bodov dostačujúci. Tento nástroj bol v konečnom dôsledku použitý ako prechodný, „pomocný“ prvok, ktorý poukázal na parametre, ktorých zmena najviac ovplyvňuje výsledok modelu. Pre tento účel boli zvolené parametre K_x a K_z , ktoré v nastavení kalibrácie a výstupe predstavujú hydraulickú vodivosť vo všetkých troch smeroch ($K_x = K_{x,y}$). Tie boli zadefinované ako parametre, ktoré sa v priebehu krokov kalibrácie menia (On?) a nastavená počiatočná hodnota násobiteľ a daného parametra.

Parameter	Type	On?	Zone/Reach	Multiplier	Minimum	Maximum
1	Kx Zone Number	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.2	0.0001	1000
2	Kx Zone Number	<input checked="" type="checkbox"/>	2	1.2	0.0001	1000
3	Kz Zone Number	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.2	0.0001	1000
4	Kz Zone Number	<input checked="" type="checkbox"/>	2	1.2	0.0001	1000
5	None	<input type="checkbox"/>	0	1	0.0001	1000

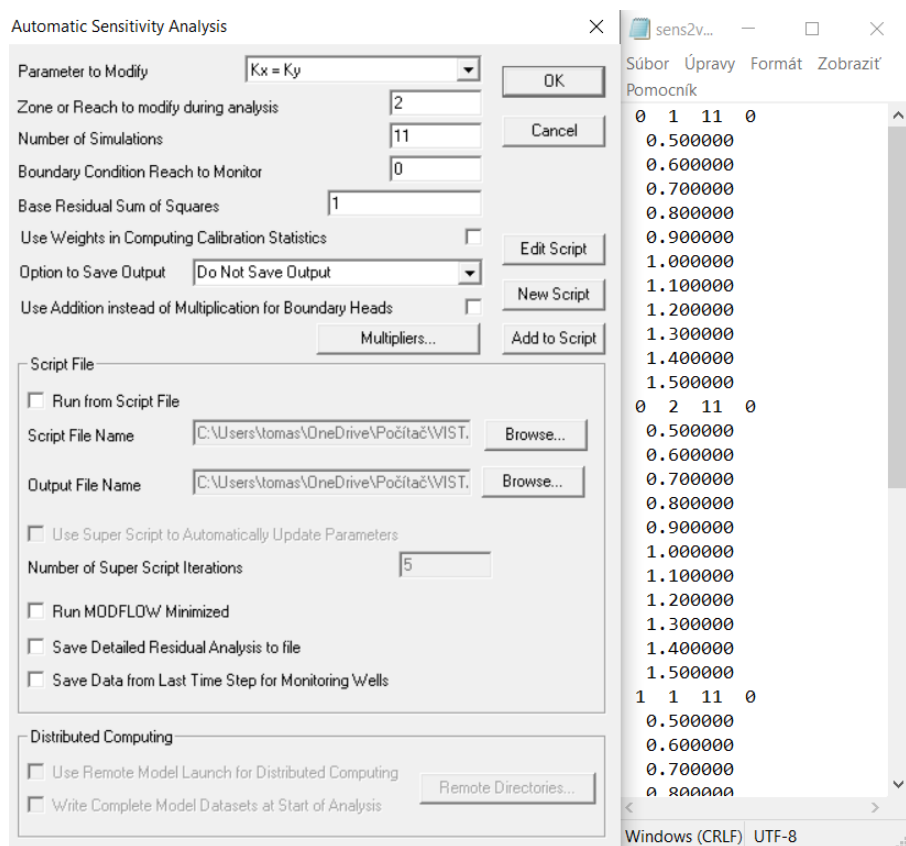
Obr. 24.: Zadanie parametrov pre kalibráciu s priradenou vrstvou (Zone/Reach).

Nastavenia parametrov automatickej kalibrácie popísané v predchádzajúcom kroku boli niekoľkokrát menené spolu s nastavením kalibrácie (obr. nižšie), až do dosiahnutia uspokojivého výsledku. Vo výsledku však tento kalibračný nástroj menil parameter K_z na veľmi vysoké hodnoty v rádoch stoviek až tisícok m/deň. Po úprave na prijateľnejšie hodnoty pomocou nasledujúcej senzitívnej analýzy sa výsledok blížil možným reálnym hodnotám.



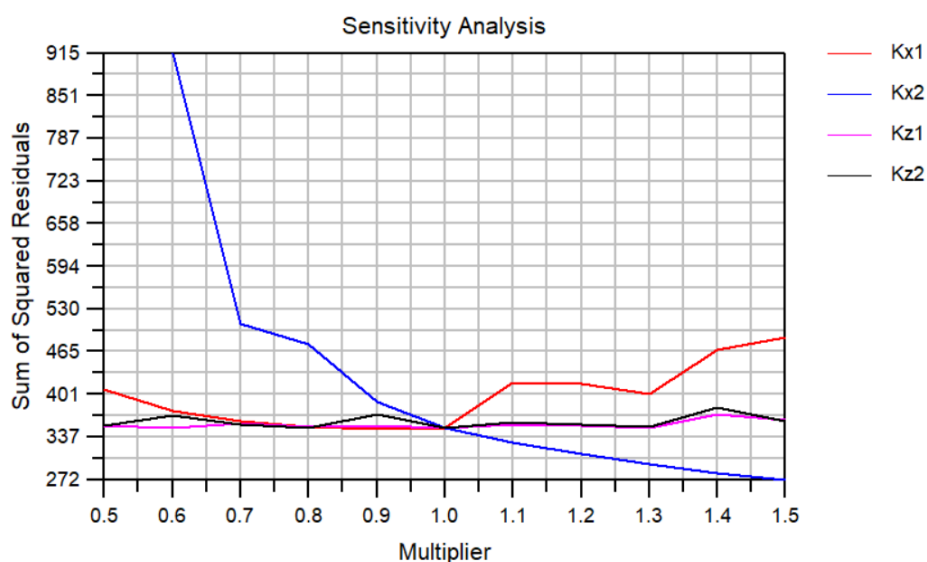
Obr. 25.: Nastavenie výpočetných parametrov automatickej kalibrácie v programe Groundwater Vistas.

SENZITÍVNA ANALÝZA



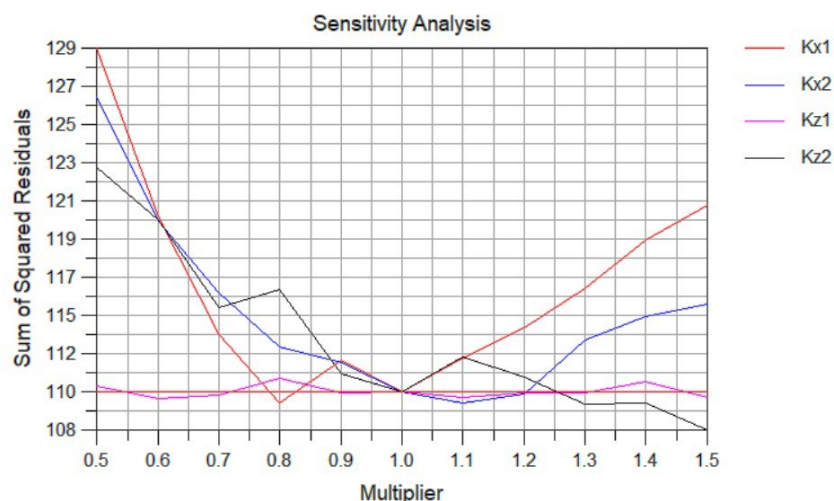
Obr. 26.: Nastavenie a skriptový súbor senzitivity analýzy v programe.

Pomocný nástroj pre ručnú kalibráciu predstavuje takzvaná senzitívna analýza, ktorej účelom je preukázať účinok malých zmien vybraných parametrov modelu na výsledný výstup, a teda jeho hodnovernosť. V jednoduchosti by mal byť dosiahnutý čo najmenší súčet druhých mocnín zvyškov (Sum of Squared Residuals) pri jednotkovom násobiteli (Multiplier) daného parametra. To dosiahneme čítaním grafov senzitívnej analýzy v jednotlivých krokoch a upravovaním parametrov podľa priebehov kriviek. Sleduje sa krivka resp. parameter, ktorý pretína ypsilonovú os v najnižšom bode. Pre príklad na nasledujúcom grafe je to parameter Kx2, ktorý predstavuje hydraulickú vodivosť v druhej modelovej vrstve pre horizontálne smery X aj Y. V príklade nižšie, pri násobení $Kx2 * 1,5$ dosiahneme zníženie súčtov štvorcov (súčtov druhých mocnín zvyškov) na 272 m^2 .



Graf 5.: Senzitívna analýza pre parametre horizontálnej a vertikálnej hydraulickej vodivosti.

Vo výsledku by mali byť potom parametre, ktoré so zmenou neprinášajú rozdielny výsledok súčtu druhých mocnín zvyškov, a tým aj výstup modelu v podobe hydraulických výšok, vo viac-menej vodorovnej rovine a krivky parametrov ovplyvňujúcich výstup modelu by mali mať ideálne parabolický tvar s vrcholom na hodnote násobiteľa „1“, ktorý predstavuje aktuálne zadanú hodnotu parametra. Pre 2. variantu ohraničenia povodia popísanú v kap. 12.2., z ktorej sú pre lepšiu názornosť aj ukážkové grafy na tejto, a nasledujúcej strane má výsledná senzitívna analýza pre všetky (aj pomocné) kalibračné body výrazne lepši výsledok ako v prípade prvej varianty.



Graf 6.: Výsledný graf senzitivnej analýzy.

Na základe výsledkov senzitivnej analýzy bolo potom pristúpené k ručnej kalibrácii a menené hydraulické vodivosti. Na záver bola kalibrácia dokončená zmenou nastavení riešiteľa ako je počet iterácií, iteračný činiteľ a podobne. V konečnom dôsledku je manuálna kalibrácia v tomto prípade vhodnejšia ako automatická, keďže dáta meraných hladín poskytujú iba veľmi omedzenú oblasť v blízkosti hrádze a taktiež výšky hladín v jednotlivých vrtoch sa značne menia aj na takto malej ploche. Výsledné hodnoty hydraulických vodivostí po kalibrácii 1. varianty sú v tabuľke nižšie.

K - skalibrované hydraulické vodivosti			
m/deň			
1. varianta	Kx	Ky	Kz
vrstva			
1	0,41	0,41	0,41
2	0,045	0,01	0,035
3	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
1a	2	2	2
2a	0,041	0,041	0,0267
m/s			
1. varianta	Kx	Ky	Kz
vrstva			
1	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-6}$
2	$5,21 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$
3	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$
1a	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$2,31 \cdot 10^{-5}$
2a	$4,75 \cdot 10^{-7}$	$4,75 \cdot 10^{-7}$	$3,09 \cdot 10^{-7}$

Tab. 6.: Prehľad skalibrovaných hydraulických vodivostí pre 1. variantu.

12.1.5. Výsledky a výstupy modelu

BEZ HRÁDZE (PRIRODZENÝ STAV)

Výsledná mapa kontúr v 1. a 2. vrstve bez pridania drenážnej oblasti je v Prílohe 8. Obsahuje výrazne zaplavenú oblasť na južnej a západnej časti pri definovanej okrajovej podmienke. To by mohlo značne skresliť výsledné určenie odtoku, možného čerpania a výsledky dynamického modelu. Modelové hladiny v kalibračných bodoch (meraných vrtoch) sú relatívne v súlade s meranými hodnotami, teda reálnymi podmienkami v blízkom okolí plánovanej podzemnej hrádze. Avšak na južnej a západnej strane povodia sa modelová hladina držala nad povrchom terénu, a aj napriek snahe vyrovnať túto kontrastnú oblasť pridaním kalibračných bodov do problematickej oblasti sa nedosiahlo uspokojivého výsledku.

V ďalšej časti bola preto 1. a 2. vrstva rozdelená do dvoch zón, ktoré predstavujú infiltračnú a drenážnu oblasť. Pre drenážnu oblasť bola potom nastavená vyššia hydraulická výška, čo je v súlade so všeobecným popisom hydrogeologického masívu, kedy oblasť drenáže má vyššiu trzmisivitu, a tým pádom aj hydraulickú vodivosť pri zachovaní mocnosti kolektoru. Pre tieto dve nové zóny bola zadaná na začiatku vodivosť 2-krát väčšia, a následne spravená samostatná senzitívna analýza pre celú drenážnu oblasť. Z nej sa následne upravovali hodnoty K kým nebol dosiahnutý výsledok lepší ako v pôvodnom prípade. Vo výsledku avšak tento koncept predstavoval aj naďalej problém v zaplavení západnej oblasti na hranici okrajovej podmienky (vid'. Obr. 27.). Problémová južná časť sa zlepšila, ale z celkového pohľadu mal model o niečo vyššiu percentuálnu chybu bilancie prítoku a odtoku ako vidno v nasledujúcom zhrnutí :

1. varianta bez drenážnej oblasti

plocha povodia = 0,476 km²

prerátaný špecifický základný odtok modelu = 2,29 l*s⁻¹km⁻²

prítok do modelu (zo zrážkovej infiltrácie) = 94,43 m³/deň

odtok z modelu (cez okrajovú podmienku) = 94,36 m³/deň

percentuálna chyba bilancie = 0,073 %

okrajová podmienka – H (hydraulická výška) = 450 m n.m. (Bílý potok)

1. varianta s drenážnym vymedzením

plocha povodia = 0,476 km²

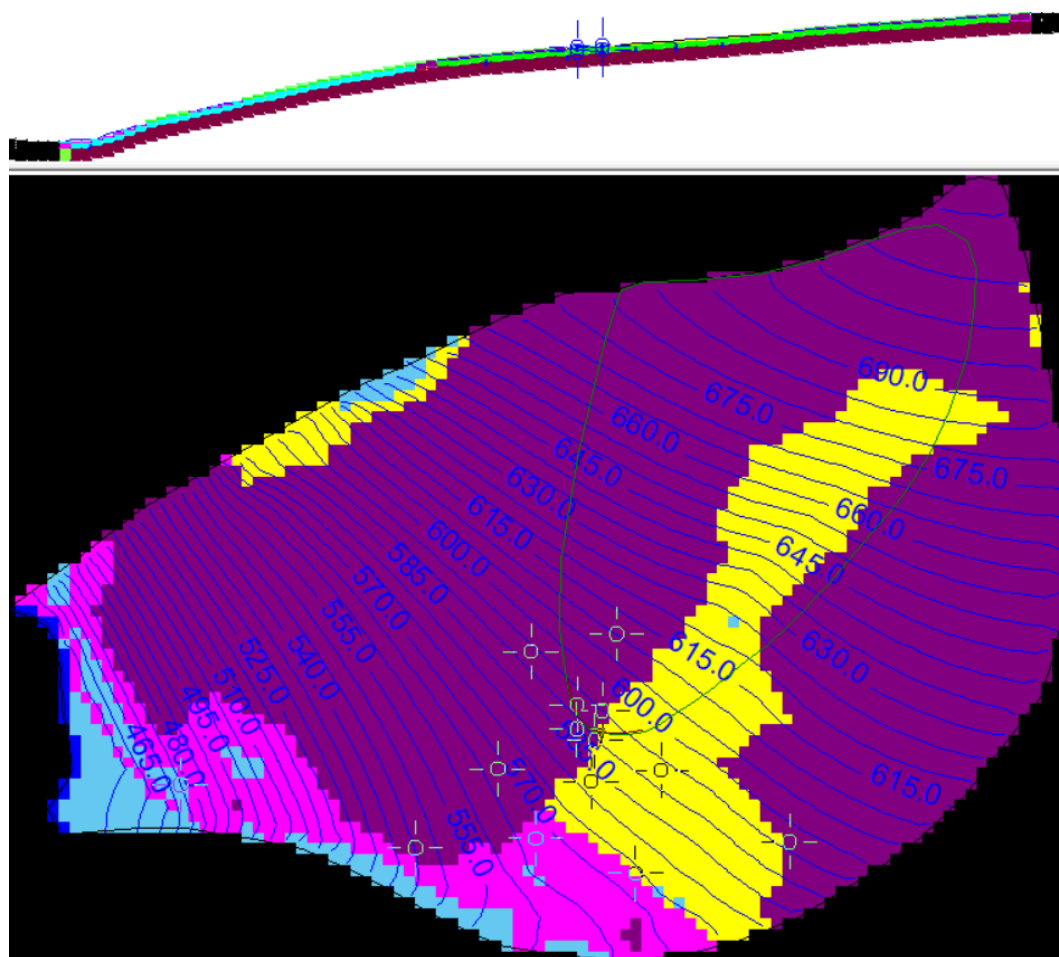
prerátaný špecifický základný odtok modelu = 2,36 l*s⁻¹km⁻²

prítok do modelu (zo zrážkovej infiltrácie) = 94,43 m³/deň

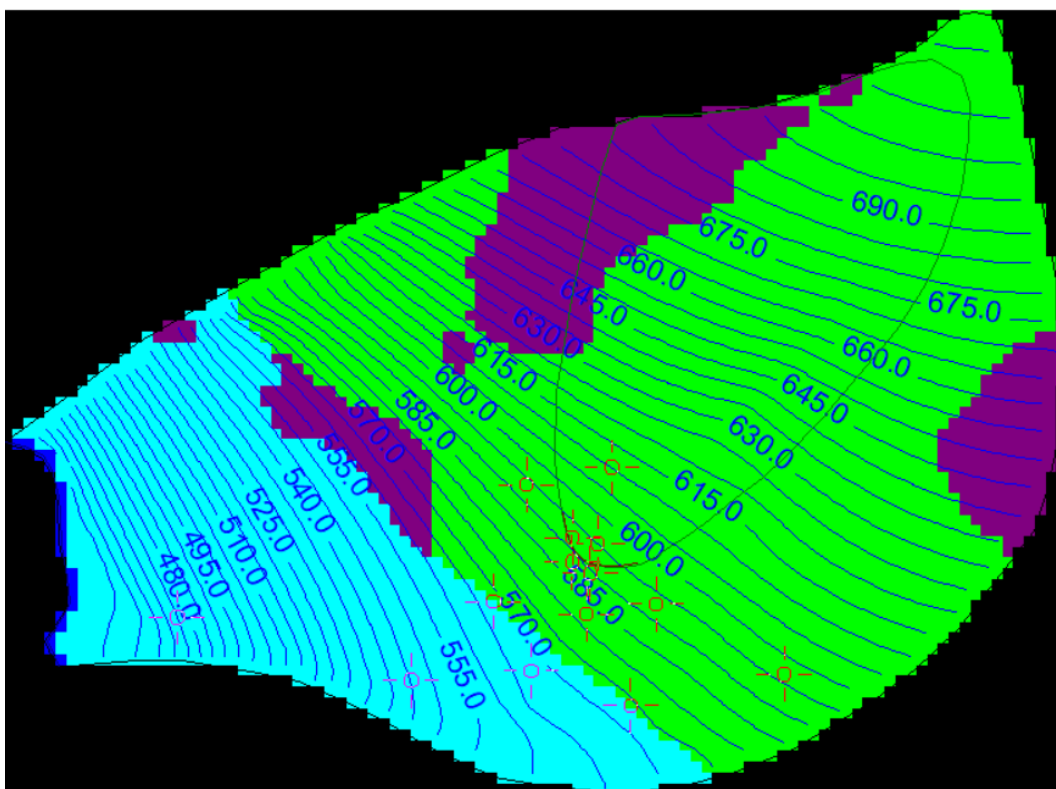
odtok z modelu (cez okrajovú podmienku) = 97,17 m³/deň

percentuálna chyba bilancie = 2,86 %

okrajová podmienka – H (hydraulická výška) = 450 m n.m. (Bílý potok)



Obr. 27.: Mapa modelových izolínii podzemnej vody v prvej variante (vrstva 1).



Obr. 28.: Mapa modelových izolinii podzemnej vody v prvej variante (vrstva 2).

V mapách izolinii podzemnej vody 1. a 2. vrstvy predstavujú tmavofialové oblasti vysušené oblasti danej vrstvy, tzn. hladina podzemnej vody je pod bázou danej vrstvy. Naopak miesta kde hladina presahuje povrch terénu a v realite by predstavovali zaplavené územie sú v prvej vrstve vyznačené svetlomodrou farbou. Ostatné farby predstavujú oblasť s voľnou hladinou vody v prvej vrstve (žltá), alebo saturované prostredie v druhej vrstve (zelená a svetlo modrá).

Výsledné porovnanie hodnôt neovplyvneného stavu v statickom režime poukazuje na rozdiely modelových výšok hladín oproti reálnym, pozorovaným výškam v desatinách až prvých jednotkách metrov. Pri pohľade na tabuľku možno konštatovať viac-menej uspokojivý výsledok vzhľadom na priestorovú variabilitu meraných hladín.

Po vymedzení a nakalibrovaní drenážnej oblasti sa zvyškové hodnoty modelovej a reálnej hladiny v takomto modeli zlepšili oproti pôvodnému konceptu v priemere o zhruba 0,5 m.

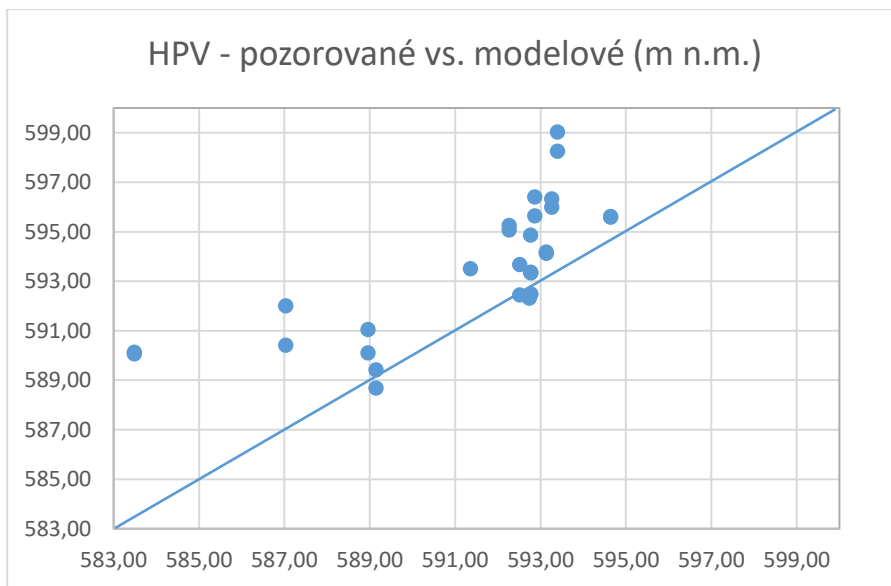
1. varianta	vrstva	HPV (m n.m.)		Δ HPV (m)
vrt		pozorovaná	modelová	rozdiel
M1	1	583,48	590,13	6,65
M2	1	589,14	588,68	-0,46
M3	1	592,77	592,48	-0,29
M4	1	594,64	595,59	0,95
M1	2	583,48	590,07	6,59
M2	2	589,14	589,42	0,28
M3	2	592,77	593,34	0,57
M4	2	594,64	595,62	0,98
J1	1	592,73	592,36	-0,37
J2	1	588,95	590,10	1,15
J3	1	587,03	592,01	4,98
J4	1	592,51	593,68	1,17
J5	1	593,13	594,18	1,05
J6	1	593,26	596,00	2,74
J7	1	592,86	596,41	3,55
J8	1	592,26	595,25	2,99
J9	1	592,76	594,86	2,10
J10	1	593,39	598,25	4,86
J1	2	592,73	592,31	-0,42
J2	2	588,95	591,05	2,10
J3	2	587,03	590,41	3,38
J4	2	592,51	592,45	-0,06
J5	2	593,13	594,13	1,00
J6	2	593,26	596,33	3,07
J7	2	592,86	595,65	2,79
J8	2	592,26	595,07	2,81
J9	2	592,76	593,36	0,60
J10	2	593,39	599,04	5,65
M1-J10	1,2	591,35	593,51	2,16

Tab. 7.: Hodnoty pozorovanej (meranej) a modelovej hladiny podzemnej vody a ich rozdiel v 1. variante bez drenážneho vymedzenia.

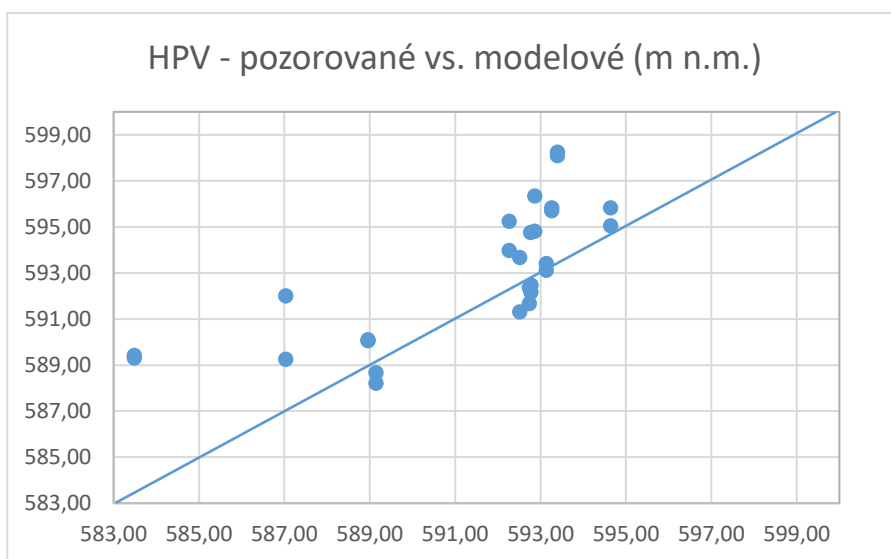
1. var_dren.	súradnice JTSK		vrstva	HPV (m n.m.)		Δ HPV (m)
vrt	X	Y		pozorovaná	modelová	rozdiel
M1	792689,06	975282,26	1	583,48	589,32	5,84
M2	792705,99	975271,87	1	589,14	588,68	-0,46
M3	792705,67	975248,86	1	592,77	592,48	-0,29
M4	792682,34	975254,30	1	594,64	595,83	1,19
M1	792689,06	975282,26	2	583,48	589,43	5,95
M2	792705,99	975271,87	2	589,14	588,22	-0,92
M3	792705,67	975248,86	2	592,77	592,16	-0,61
M4	792682,34	975254,30	2	594,64	595,06	0,42
J1	792684,70	975272,79	1	592,73	592,37	-0,36
J2	792697,17	975269,92	1	588,95	590,10	1,15
J3	792703,72	975268,00	1	587,03	592,01	4,98
J4	792702,76	975256,65	1	592,51	593,68	1,17
J5	792686,62	975260,17	1	593,13	593,13	0,00
J6	792684,70	975248,34	1	593,26	595,83	2,57
J7	792693,01	975245,79	1	592,86	596,35	3,49
J8	792702,44	975241,63	1	592,26	595,25	2,99
J9	792694,77	975258,09	1	592,76	594,76	2,00
J10	792689,97	975230,13	1	593,39	598,25	4,86
J1	792684,70	975272,79	2	592,73	591,68	-1,05
J2	792697,17	975269,92	2	588,95	590,06	1,11
J3	792703,72	975268,00	2	587,03	589,25	2,22
J4	792702,76	975256,65	2	592,51	591,32	-1,19
J5	792686,62	975260,17	2	593,13	593,41	0,28
J6	792684,70	975248,34	2	593,26	595,70	2,44
J7	792693,01	975245,79	2	592,86	594,81	1,95
J8	792702,44	975241,63	2	592,26	593,98	1,72
J9	792694,77	975258,09	2	592,76	592,42	-0,34
J10	792689,97	975230,13	2	593,39	598,10	4,71
M1-J10			1,2	591,35	592,99	1,64

Tab. 8.: Hodnoty pozorovanej (meranej) a modelovej hladiny podzemnej vody a ich rozdiel v 1. variante s drenážnym vymedzením.

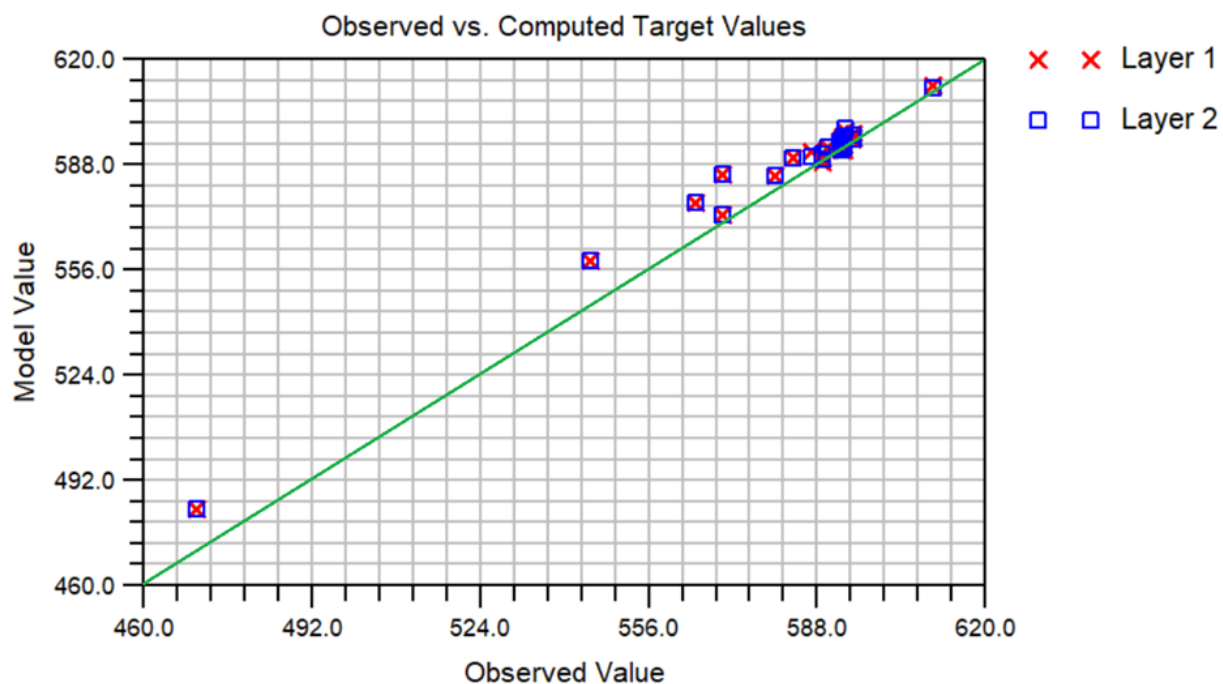
V nasledujúcich grafoch sú potom pre prehľadnosť obe hodnoty vynesené do bodu pre každý sledovaný (reálny) vrt a pre všetky kalibračné body, vrátane pomocných. Grafy sú preložené priamkou predstavujúcu sto percentnú zhodu meraných a modelových hodnôt hydraulických výšok.



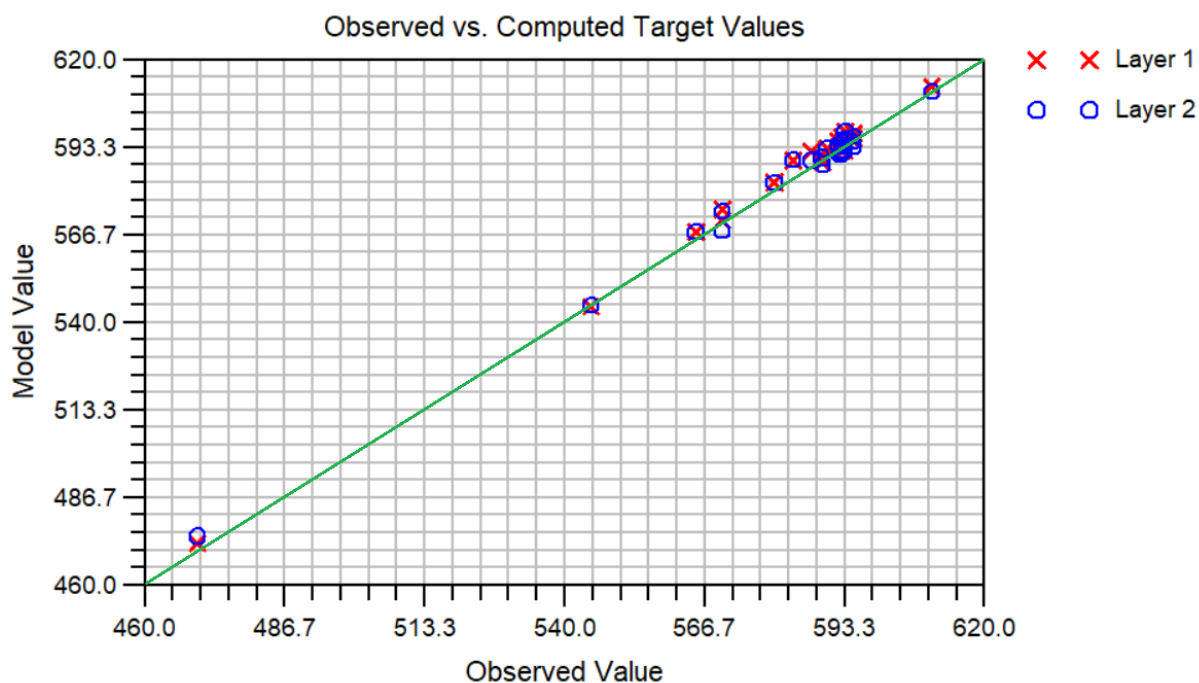
Graf 7.: Porovnanie meraných výšok hladín priamo vo vrtoch na lokalite s modelovými (bez vymedzenej drenážnej oblasti).



Graf 8.: Porovnanie meraných výšok hladín priamo vo vrtoch na lokalite s modelovými (s vymedzenou drenážnou oblasťou).



Graf 9.: Korelácia výšky hladiny všetkých kalibračných bodov (merané + pomocné s hladinou 5 m pod terénom) s modelovými, bez vymedzenia drenážnej oblasti.



Graf 10.: Korelácia výšky hladiny všetkých kalibračných bodov (merané + pomocné s hladinou 5 m pod terénom) s modelovými, s vymedzením drenážnej oblasti.

UMIESTNENIE HRÁDZE

Po kalibrácii a vynesení výsledkov neovplyvneného režimu, ktorý by predstavoval v realite prírodné podmienky priebehu podzemnej vody sa do modelovej oblasti s najpresnejšou možnou mierou podľa technického projektu vložila podzemná hrádza, v programe pod záložkou okrajových podmienok s názvom „Wall“. Ta sa umiestnila do hĺbky 12 m a oproti okoliu bola v bunkách, ktoré zahŕňala nastavená hodnota hydraulickej vodivosti o 3 až 4 rády menšia. Nastavenie nulovej, alebo takmer nulovej hydraulickej vodivosti je pre program v tomto prípade nežiadúce a zmatečné pre výpočet, a teda vykreslenie správnych, postupných izolínní podzemnej vody. Taktiež v realite je rátane s malou priepustnosťou medzi pilotami, ktoré budú tvoriť teleso hrádze. Presná hydraulická vodivosť hrádze v modeli je 0,00001 m/deň (t.j. $1,16 \cdot 10^{-10}$ m/s). V nastavení hrádze taktiež nastavujeme elementy zahrnuté do výpočtu, ktoré predstavujú v tomto prípade 4 strany štvorca výpočetnej bunky. Zaznačíme všetky 4 strany pre dosiahnutie jednoliateho celku vo výpočetnej sieti. Takto nastavený model potom spustíme opätovne a porovnáme s výstupom neovplyvneného režimu.

Toková bilancia je zhrnutá nižšie. Všetky ostatné hodnoty (plocha povodia, prítok do modelu..) sú rovnaké ako v modeli bez hrádze.

1. varianta s hrádzou

odtok z modelu (cez okrajovú podmienku) = 92,67 m³/deň

percentuálna chyba bilancie s hrádzou = 1,88 %

1. varianta drenážna oblasť s hrádzou

odtok z modelu (cez okrajovú podmienku) = 99,11 m³/deň

percentuálna chyba bilancie s hrádzou = 4,84 %

Jeden z hlavných výstupov potom predstavuje porovnanie výšky hladín v sledovacích bodoch (vrtoch), ktoré predstavujú 4 monitorovacie vrty M1-M4. Vrty M1 a M2 sa nachádzajú pod hrádzou, tzn. za návodnou stranou hrádze. Preto je v týchto dvoch vrtoch očakávaný pokles hladín. Naopak vo vrtoch M3 a M4 je predpoklad vysokého nárastu hladiny v stacionárnom režime, keďže sa nachádzajú nad hrádzou (na jej návodnej strane).

Pozorovací vrt	Pozorovaná HPV (m)	Neovplyvnený stav (m)	S hrádzou (m)	Reziduál prirodzený stav (m)	Reziduál s hrádzou (m)	Rozdiel hladín (m)
M1	583,48	590,07	589,32	6,59	5,84	-0,75
M2	589,14	589,42	588,68	0,28	-0,46	-0,74
M3	592,77	593,34	604,03	0,57	11,26	10,69
M4	594,64	595,62	604,72	0,98	10,08	9,10

Tab. 9.: Rozdiely hladín v monitorovacích vrtoch - Varianta 1 bez drenážnej oblasti.

Pozorovací vrt	Pozorovaná HPV (m)	Neovplyvnený stav (m)	S hrádzou (m)	Reziduál prirodzený stav (m)	Reziduál s hrádzou (m)	Rozdiel hladín (m)
M1	583,48	589,43	587,02	5,95	3,54	-2,40
M2	589,14	588,22	586,44	-0,92	-2,70	-1,78
M3	592,77	592,16	602,25	-0,61	9,48	10,09
M4	594,64	595,06	605,44	0,42	10,80	10,38

Tab. 10.: Rozdiely hladín v monitorovacích vrtoch - Varianta 1 s drenážnou oblasťou.

Po porovnaní účinku samotnej hrádzky v prostredí bolo navrhnuté modelové riešenie pre odhad možného množstva vody, ktorú by sme boli schopní konštantne odčerpávať z vrtu v ustálenom režime bez vyprázdnenia (vysušenia) 2. modelovej vrstvy v jeho okolí. Pre tento účel bola pridaná okrajová podmienka, ktorá predstavuje vrt v jednom bode (bunke) modelu, na ktorom bola nastavovaná rôzna výdatnosť čerpania a metódou pokus – omyl sledovaná hladina podzemnej vody v bunkách okolo vrtu. Pri vysušení prvej bunky pri vrte v 2. vrstve bola hodnota čerpania (odtoku) z vrtu braná ako hraničná pre maximálne konštantné čerpanie z kolektora bez jeho prečerpania a teda vysušenia. Získané hodnoty čerpania potom možno porovnať s maximálnym čerpaním bez pridania hrádzky, ktorý bol určený rovnakým postupom.

Ďalším porovnávacím výstupom, ktorým sa dá odhadnúť maximálny odber vody z hrádze je pridaná okrajová podmienka voľnej drenáže. V tomto prípade bola nastavená drenáž v dvoch úrovniach. Prvá, celková na bázy 1. a 2. modelovej vrstvy, ktorej výsledná hodnota predstavuje celkový prietok vody zadanou podmienkou drenáže. V druhom prípade bola nastavená drenáž do výšky 0,5 m pod terénom predstavujúca odber vody, ktorý je nad povrchom terénu a teda možno ho brať ako množstvo vody, ktoré je potrebné odčerpať, prípadne uschovať v druhotných nádržiach. Je nutné podotknúť, že sa stále jedná ustálený režim s nepretržitým dodávaním vody do kolektora zo zadanej efektívnej infiltrácie. Na základe množstva a veľkosti zrážkových udalostí a miery evapotranspirácie, resp. množstva efektívnej infiltrácie je tento údaj samozrejme v reálnych podmienkach premenný s časom. Pre porovnanie účinnosti hrádze je ale statický model pre toto riešenie a hrubú predstavu prietoku oblasťou postačujúci. Výsledky pre prvú variantu sú zhrnuté v nasledujúcich tabuľkách :

Bez pridania drenážnej oblasti – neovplyvnené maximálne čerpanie z kolektoru (bez hrádze) = 4,1 m³/deň.

hodnota čerpania/prietoku	čerpací vrt pred hrádzou	drenáž pred hrádzou na bázy 1. a 2. vrstvy	drenáž pred hrádzou 0,5 m pod terénom
m ³ /deň	5,4	5,18	4,16
l/s	0,0625	0,06	0,048

Tab. 11.: Prehľad výsledkov odberu vody z čerpaceho vrtu a prietoku drenážnou podmienkou.

S drenážnou oblasťou – neovplyvnené maximálne čerpanie z kolektoru (bez hrádze) = 4,1 m³/deň.

hodnota čerpania/prietoku	čerpací vrt pred hrádzou	drenáž pred hrádzou na bázy 1. a 2. vrstvy	drenáž pred hrádzou 0,5 m pod terénom
m ³ /deň	5,8	5,16	4,54
l/s	0,0671	0,0597	0,0525

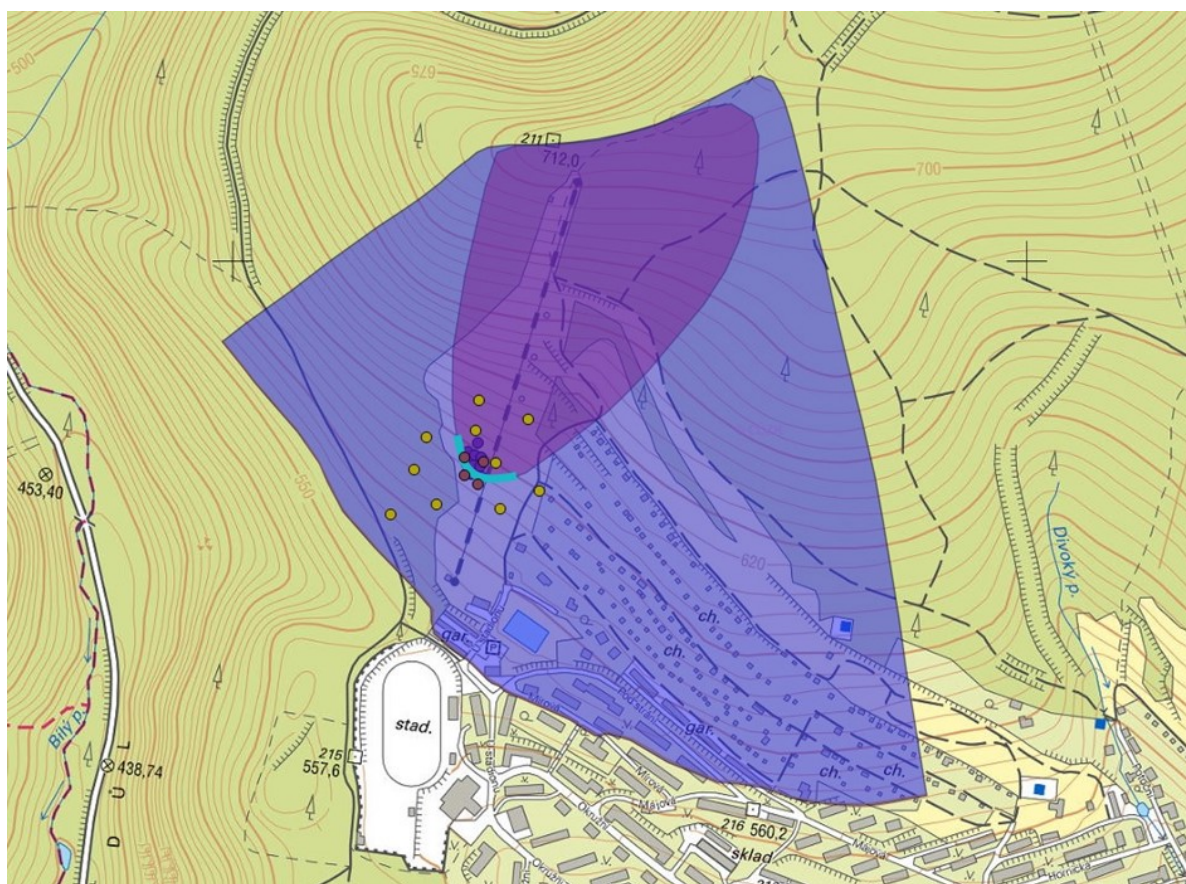
Tab. 12.: Prehľad výsledkov odberu vody z čerpaceho vrtu a prietoku drenážnou podmienkou.

12.2. 2. Varianta ohraničenia povodia

Z dôvodu neuspokojivých výsledkov, najmä z pohľadu celkového priebehu hladín sa následne pristúpilo na vymedzenie povodia s drenážnou hranicou na zvolenej vrstevnici, ktorá v morfolologickej mape predstavuje líniu nad problematickým strmým údolím Bíleho potoka. Týmto by sa malo zamedziť vykreslením kontrastných miest izolínii podzemnej vody ako vo variante 1. V konečnom dôsledku sa teda voda drénuje väčším profilom.

12.2.1. Vymedzenie plochy povodia

V druhej variante teda predstavovalo hlavnú a zásadnú zmenu vymedzenie povodia modelovej oblasti. Kvôli zjavnému obmedzeniu a skresleniu izolínii podzemnej vody, v dôsledku strmej a kontrastnej morfológie údolia Bíleho potoka, bolo pristúpené na alternatívne vymedzenie, kde hraničnú drenážnu líniu predstavuje vrstevnica, a na ňu nastavená okrajová podmienka stálej hladiny 5 metrov pod terénom. Táto plocha nám eliminuje ostrý a skreslený prechod do údolia Bíleho potoka, a celková morfológia je pravidelnejšia aj v rámci sklonu svahu ako v prvej variante. Plocha povodia a teda aktívnej modelovej oblasti je 0,483 km².



Obr. 29.: Vymedzenie povodia 2. varianty s kalibračnými bodmi a uzáverovým povodím.

12.2.2. Modelová sieť, vstupné dáta pre model a morfológia

Základná forma modelovej siete ostala bez zmeny tzn. štvorce o rozmeroch 10m x 10m. Model je takisto trojvrstevný a morfológia bázy jednotlivých vrstiev vzhľadom na terén ostáva taktiež nezmenená. Model je teda koncipovaný ako trojvrstevný a v prvej fázy stacionárny. Vstupné parametre hydraulických vodivosti pre túto variantu sú rovnaké, ako skalibrované hydraulické vodivosti v 1. variante. Takto zadané vstupné parametre boli vhodnejšie pre prvotný výpočet a uľahčili tak ďalšie kroky kalibrácie a prácu s modelom. Hodnoty hydraulických vodivosti pre jednotlivé vrstvy spolu s retenčnými prvkami, ktoré boli použité pre neskoršiu simuláciu podľa nového technického projektu sú zhrnuté v tabuľke nižšie. Efektívna hodnota zrážok zadaná v modeli zostáva nemenná tj. 0,000204 m/deň.

Modelová vrstva	Zaradenie v rámci hydrogeologického masívu / popis	Mocnosť (m)	Vstupné Kx (m/s)	Vstupné Ky (m/s)	Vstupné Kz (m/s)
1	zvetralinová zóna	3	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-6}$
2	puklinová zóna	9	$5,21 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$
3	nepriepustné podložie	20	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$
1_nádrž	nádrž + obsyp / rýhy 1. vrstve	3	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
2_nádrž	nádrž + obsyp / rýhy v 2. vrstve	9	$5,79 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$

Tab. 13.: Vstupné hydraulické vodivosti pre jednotlivé vymedzené oblasti 2. varianty.

12.2.3. Okrajové podmienky a kalibrácia modelu

S výnimkou okrajovej podmienky vonkajšej oblasti modelu za ohraničením povodia, kde je nastavený nulový prietok sa do modelu 2. varianty zadala okrajová podmienka 1. typu (Dirichletova), ktorá predstavuje konštantnú hydraulickú výšku na južnej hranici (najnižšia drenážna hranica na vrstevnici). Tá bola prednastavená na 5 m pod terénom. Hranica modelu s okrajovou podmienkou je braná z vrstevnice nad zrázom do údolia Bílého potoka, ktorá predstavuje nadmorskú výšku 560 m n.m. Okrajová podmienka konštantnej hladiny bola teda zadaná na hodnotu 555 m. V neskoršej fázy práce, ako bude komentované nižšie v popise kalibrácie, sa bude táto hodnota ešte meniť.

Kalibrácia modelu v 2. variante bola uľahčená a parametre a všeobecné nastavenia modelu boli prevzaté z 1. varianty. Tie obsahovali najmä zmenu riešiteľa z PCG2 na SOR. Nasledoval proces kalibrácie, ktorý je totožný s prvou variantou. Proces autokalibrácie a následnej senzitívnej analýzy posunul parameter vertikálnej hydraulickej vodivosti v druhej vrstve (puklinová zóna) o jeden rád vyššie. Následne sa ešte mierne upravili parametre ostatných hydraulických vodivostí s výnimkou horizontálnej „Ky“ v druhej modelovej vrstve, ktorá ostala nezmenená. Z dôvodu vyššej percentuálnej chyby bola na záver posunutá okrajová podmienka o 3 m vyššie (2 m pod povrch terénu), ktorú tento krok znížil o jednotky %.

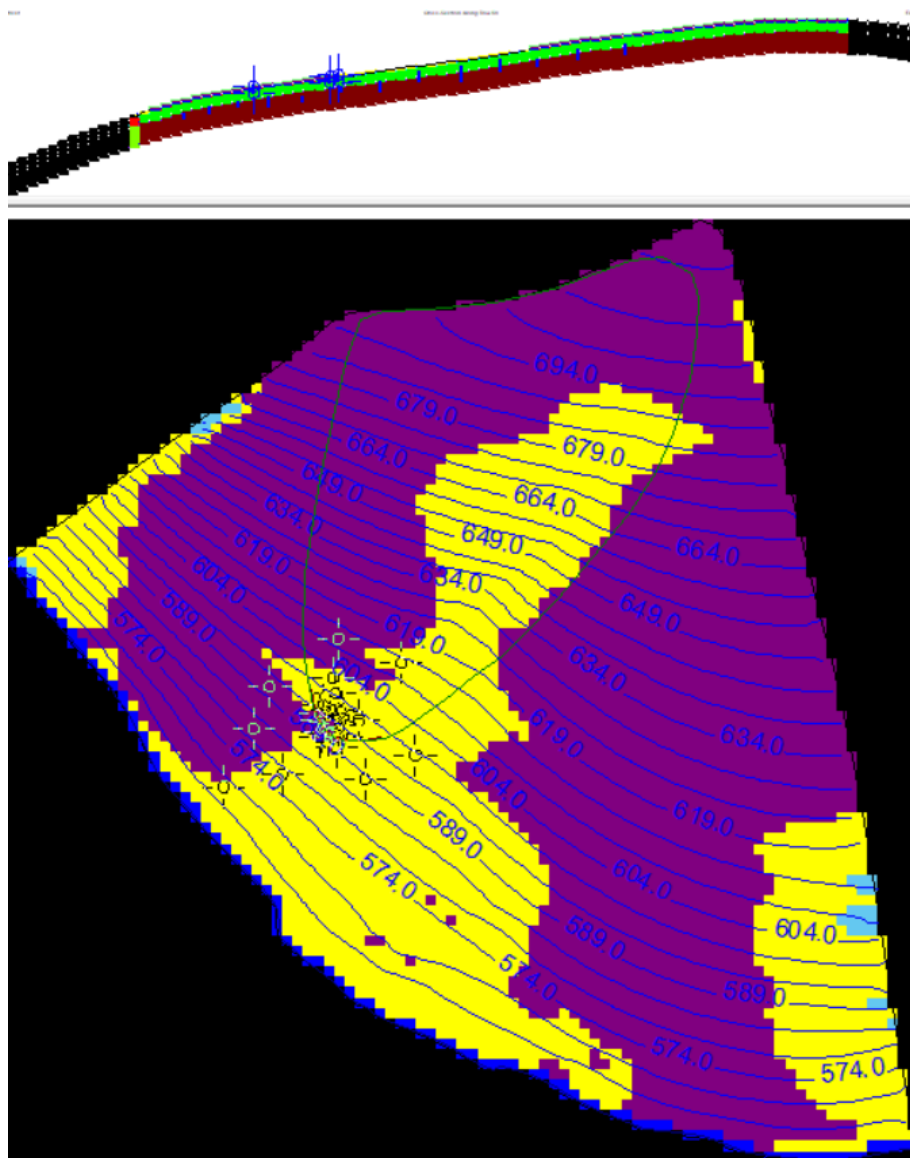
Merané kalibračné body sú rovnaké ako v popise kalibrácie varianty 1.

K - skalibrované hydraulické vodivosti			
m/deň			
2. varianta	Kx	Ky	Kz
vrstva			
1	0,582	0,68	0,68
2	0,048	0,01	0,26
3	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
m/s			
2. varianta	Kx	Ky	Kz
vrstva			
1	$6,74 \cdot 10^{-6}$	$7,87 \cdot 10^{-6}$	$7,87 \cdot 10^{-6}$
2	$5,56 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$3,01 \cdot 10^{-6}$
3	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$

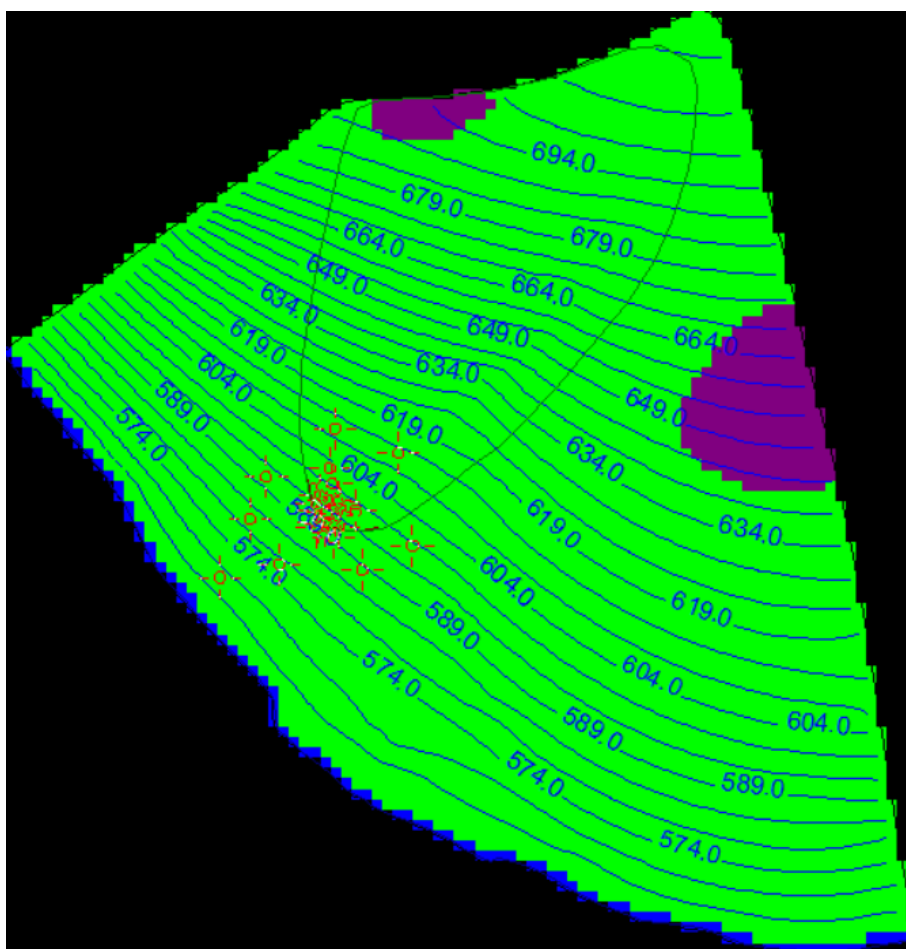
Tab. 14.: Výsledné prijaté hodnoty hydraulických vodivostí po kalibrácii pre 2. variantu povodia.

12.2.4. Výsledky a výstupy modelu

Na prvý pohľad možno z vykreslených izolínii podzemnej vody konštatovať lepší výsledok a tým pádom aj presvedčivejšie závery. Celkovo sa zlepšili izolínie podzemnej vody v prvej, aj v druhej vrstve, kedy fialovou farbou je vykreslená vysušená oblasť prvej, alebo druhej vrstvy. Oblasť modelu taktiež neobsahuje takmer žiadne podmäčané územie.



Obr. 30.: Mapa modelových izolínii podzemnej vody v 2. variante (vrstva 1).



Obr. 31.: Mapa modelových izolínii podzemnej vody v 2. variante (vrstva 2).

Bilančné hodnoty spolu s prerátaným špecifickým základným odtokom, chybou a prijatou hodnotou výšky hladiny okrajovej podmienky sú zhrnuté nižšie.

2. varianta

plocha povodia = $0,483 \text{ km}^2$

prítok = $99,11 \text{ m}^3/\text{deň}$

odtok = $99,34 \text{ m}^3/\text{deň}$

špecifický základný odtok = $2,38 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$

percentuálna chyba bilancie = $0,23 \%$

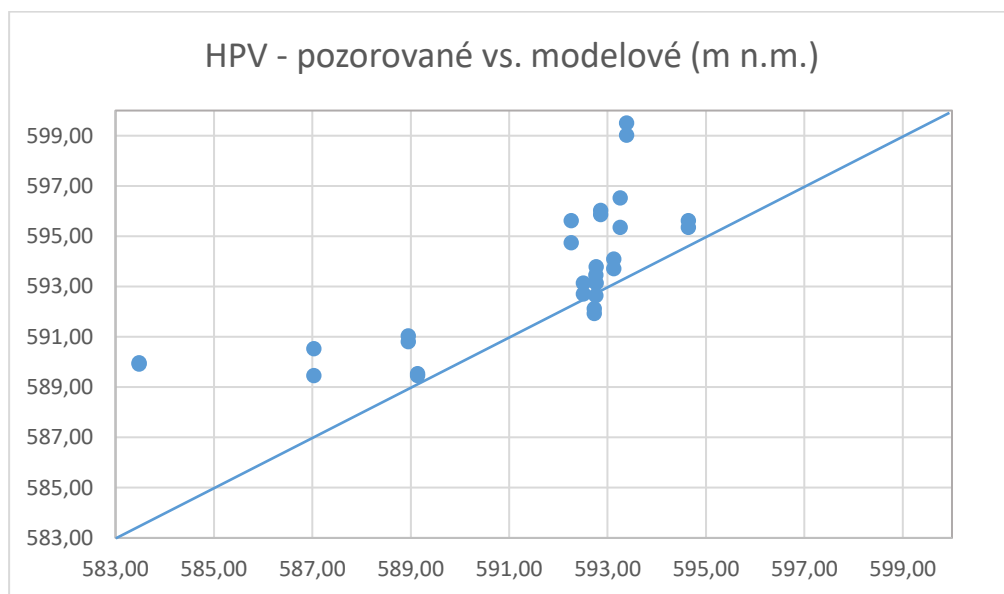
okrajová podmienka – $H = 558 \text{ m n.m.}$ (na vrstevnici 560 m n.m.)

Z výsledných rozdielových hodnôt modelovej a pozorovanej hladiny podzemnej vody je možné brať model za viac-menej uspokojivý, napriek relatívne malému plošnému rozptylu sledovaných bodov a zároveň ich veľkej variabilite v rámci meraných hladín. Priemerná hodnota rozdielov meraných a modelových hladín je len o niečo nižšia ako pri prvej variante bez drenážneho vymedzenia a vyššia ako v prípade varianty s drenážnym vymedzením. Priemer značne zhoršujú najmä dva vrty, v ktorých bola hladina oproti ostatným o dosť nižšie a to M1 a J10. Maximálny rozdiel je v monitorovacom vrte M1 – 6,49 m a minimálny potom vo vrte J4 – 0,2 m.

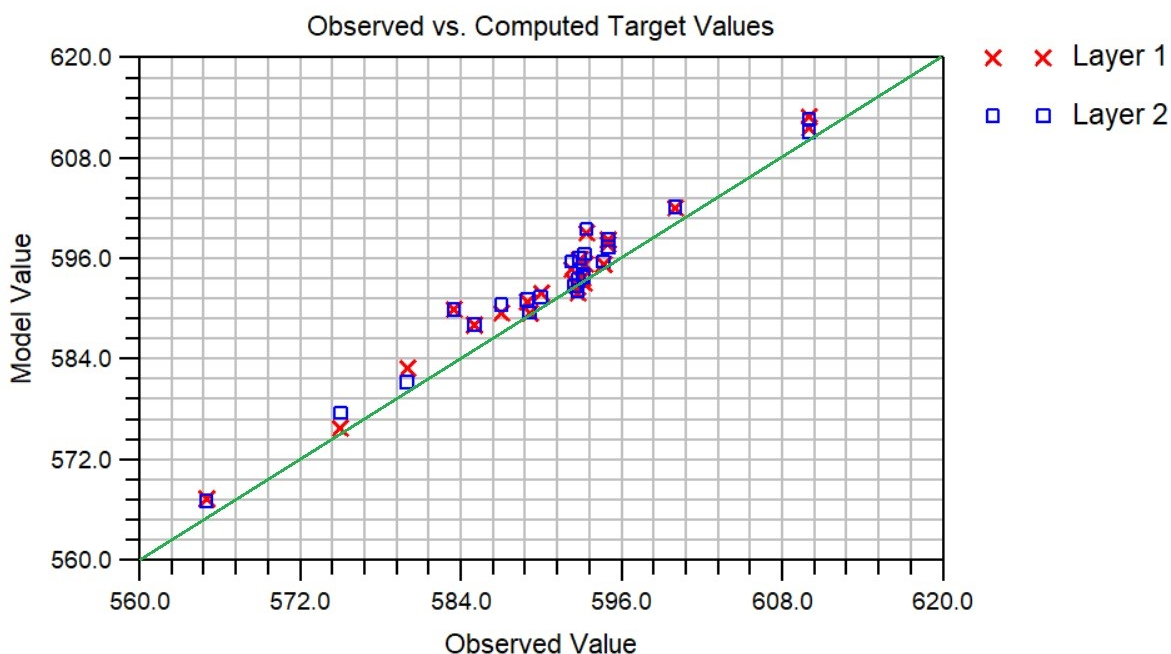
2.varianta	súradnice JTSK		vrstva	HPV (m n.m.)		Δ HPV (m)
vrt	X	Y		pozorovaná	modelová	rozdiel
M1	792689,06	975282,26	1	583,48	589,97	6,49
M2	792705,99	975271,87	1	589,14	589,46	0,32
M3	792705,67	975248,86	1	592,77	593,14	0,37
M4	792682,34	975254,30	1	594,64	595,36	0,72
M1	792689,06	975282,26	2	583,48	589,92	6,44
M2	792705,99	975271,87	2	589,14	589,53	0,39
M3	792705,67	975248,86	2	592,77	593,80	1,03
M4	792682,34	975254,30	2	594,64	595,63	0,99
J1	792684,70	975272,79	1	592,73	591,93	-0,80
J2	792697,17	975269,92	1	588,95	590,81	1,86
J3	792703,72	975268,00	1	587,03	589,46	2,43
J4	792702,76	975256,65	1	592,51	593,14	0,63
J5	792686,62	975260,17	1	593,13	593,71	0,58
J6	792684,70	975248,34	1	593,26	595,36	2,10
J7	792693,01	975245,79	1	592,86	595,86	3,00
J8	792702,44	975241,63	1	592,26	594,74	2,48
J9	792694,77	975258,09	1	592,76	592,65	-0,11
J10	792689,97	975230,13	1	593,39	599,02	5,63
J1	792684,70	975272,79	2	592,73	592,12	-0,61
J2	792697,17	975269,92	2	588,95	591,04	2,09
J3	792703,72	975268,00	2	587,03	590,53	3,50
J4	792702,76	975256,65	2	592,51	592,71	0,20
J5	792686,62	975260,17	2	593,13	594,09	0,96
J6	792684,70	975248,34	2	593,26	596,53	3,27
J7	792693,01	975245,79	2	592,86	596,03	3,17
J8	792702,44	975241,63	2	592,26	595,63	3,37
J9	792694,77	975258,09	2	592,76	593,47	0,71
J10	792689,97	975230,13	2	593,39	599,51	6,12
M1-J10			1,2	591,35	593,40	2,05

Tab. 15.: Hodnoty pozorovanej (meranej) a modelovej hladiny podzemnej vody a ich rozdiel v 2. variante.

Pre prehľadnejšie znázornenie pozorovaných (meraných) hladín a ich modelových výpočtov sú nižšie grafy, ktorých znázornená priamka predstavuje 100 percentnú zhodu. Čím sa vynesené body blížia modrej, resp. zelenej priamke tým je model presnejší z pohľadu vierohodnosti výšky hladín podzemnej vody k realite.



Graf 11.: Porovnanie meraných výšok hladín priamo vo vrtoch na lokalite s modelovanými.



Graf 12.: Porovnanie všetkých kalibračných bodov (merané + pomocné s hladinou 5 m pod terénom) s modelovými.

UMIESTNENIE HRÁDZE

Samotné nastavenie hrádze a postup, ktorým bola simulovaná je totožný s prvou variantou. Teleso teda prebieha do hĺbky 12 m na nepriepustné podložie a má minimálnu hydraulickú vodivosť (0,00001 m/deň). Výsledná bilancia odtoku sa znížila o cca. 0,01 m³/deň pri mierne nižšej percentuálnej chybe ako je vidno nižšie. Ostatné parametre a hodnoty sú totožné ako pri stacionárnom režime bez hrádze.

Bilančné zhodnotenie (prítok rovnaký ako bez hrádze) :

2. varianta s hrádzou

odtok s hrádzou = 99,25 m³/deň

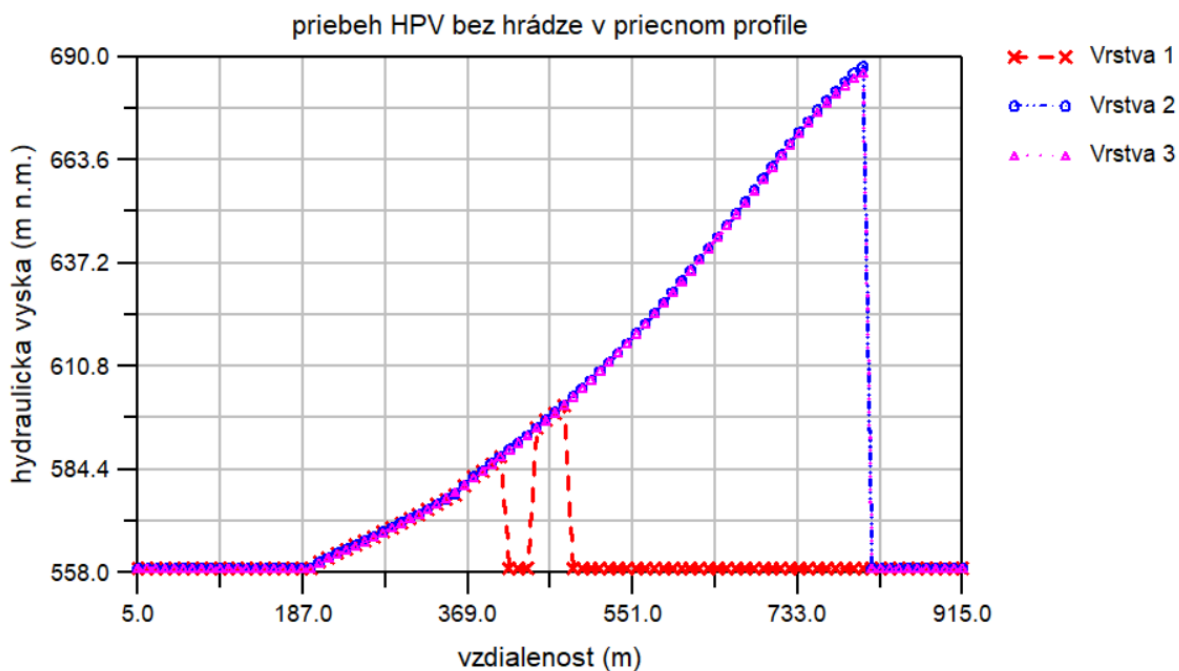
percentuálna chyba bilancie s hrádzou = 0,15 %

Takisto ako pri prvej variante, aj pri druhej boli porovnané zmeny výšky modelovej hladiny v 4 monitorovacích vrtoch. Aj v tomto prípade podľa predpokladu v monitorovacích vrtoch pred telesom hrádze došlo k zvýšeniu hladiny a to o 8,12 m vo vrte M4 a 10,15 m vo vrte M3. Vo vrtoch za telesom hrádze hladina naopak poklesla , v tomto prípade vo väčšej miere ako v prvej variante a to o 2,75 m (M1) a 6,61 m (M2).

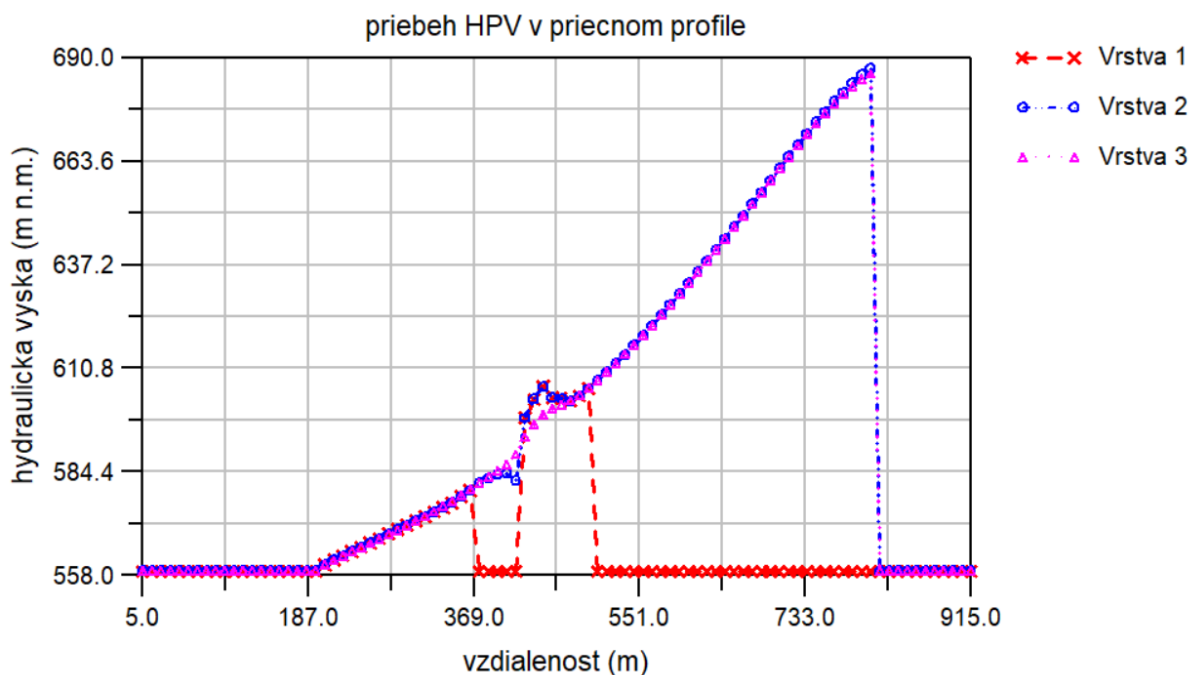
Pozorovací vrt	Pozorovaná HPV (m)	Neovplyvnený stav (m)	S hrádzou (m)	Reziduál prirodzený stav (m)	Reziduál s hrádzou (m)	Rozdiel hladín (m)
M1	583,48	589,92	587,17	6,44	3,69	-2,75
M2	589,14	589,53	582,92	0,39	-6,22	-6,61
M3	592,77	593,8	603,95	1,03	11,18	10,15
M4	594,64	595,63	603,75	0,99	9,11	8,12

Tab. 16.: Rozdiely meraných (pozorovaných) a modelových hladín vo vrtoch M1 až M4.

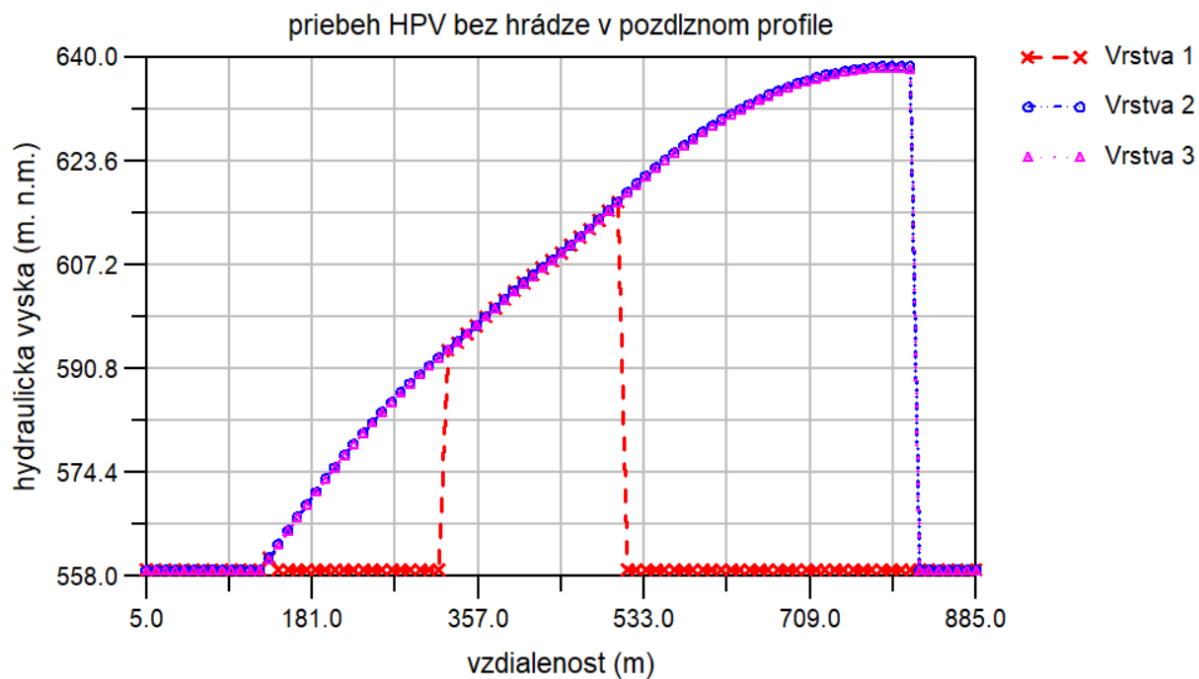
Priamo v programe je potom možnosť vykreslenia profilu priebehu hladiny podzemnej vody v zadanom reze. Nižšie je porovnaná situácie prírodného (neovplyvneného) režimu priebehu hladiny a po nasimulovaní hrádze. Pre tento prípad bol zvolený priečný aj pozdĺžny profil záujmovým územím, ktoré v oboch prípadoch samozrejme vedú cez teleso hrádze.



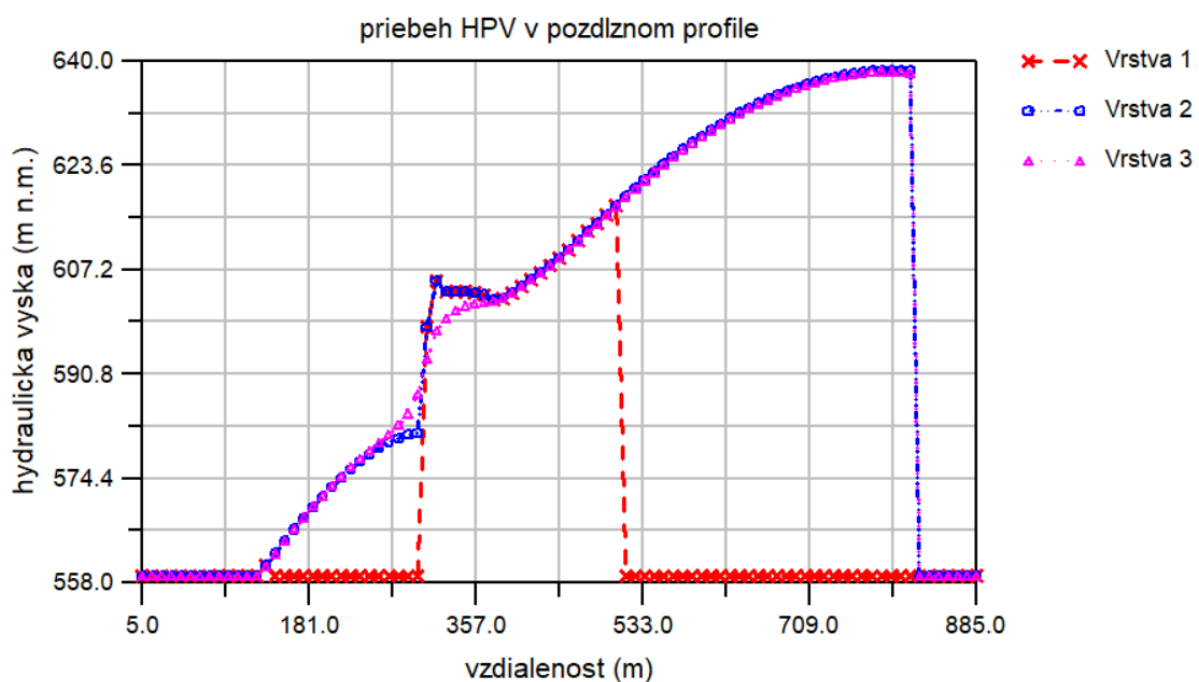
Graf 13.: Priebeh hladiny podzemnej vody v priečnom profile bez hrádze.



Graf 14.: Priebeh hladiny podzemnej vody v priečnom profile s nasimulovaním podzemnej hrádze.



Graf 15.: Priebeh hladiny podzemnej vody v pozdĺžnom profile bez hrádze.



Graf 16.: Priebeh hladiny podzemnej vody v pozdĺžnom profile s nasimulovaním podzemnej hrádze.

Ďalší výstup predstavuje maximálne množstvo čerpania z vrtu pred hrádzou bez prečerpania 2. modelovej vrstvy a teda jej vysušenia v okolí vrtu. Výsledné hodnoty sú podobné ako pri prvej variante a líšia sa v jednotkách desiatín m³/deň. Maximálny odber z vrtu je potom 5,6 m³/deň, čo predstavuje priemernú hodnotu výsledku z prvej varianty bez drenážnej, a s drenážnou oblasťou. Takisto bola nasimulovaná podmienka voľnej drenáže v určených hĺbkach pod zemským povrchom, ktoré ostali nemenné a vo výstupe potom predstavujú hodnotu celkového odtoku cez určené bunky do dosiahnutia zadanej výšky drenážneho vývodu. Pri dosiahnutí stavu hladiny sa bunka deaktivuje a z kolektora sa neodoberá cez drenážny vývod ďalej žiadna voda.

Výsledok je potom o niečo vyšší ako v prvej variante pre drenáž celého kolektora, ako aj drenáž 0,5 m pod terénom. Hodnota drenáže 0,5 m pod terénom nám slúži ako odhad množstva vody, ktoré by bolo potrebné odvieť, aby nedošlo k zaplaveniu terénu a hladina sa držala na jej úrovni.

Hodnota maximálneho čerpania z vrtu v prirodzenom stave bez hrádze dosahuje v ustálenom režime – 4,2 m³/deň.

Ako vyplýva z nasledujúcej tabuľky hodnota možného čerpania sa zvýši po vybudovaní hrádze o 1,4 m³/deň.

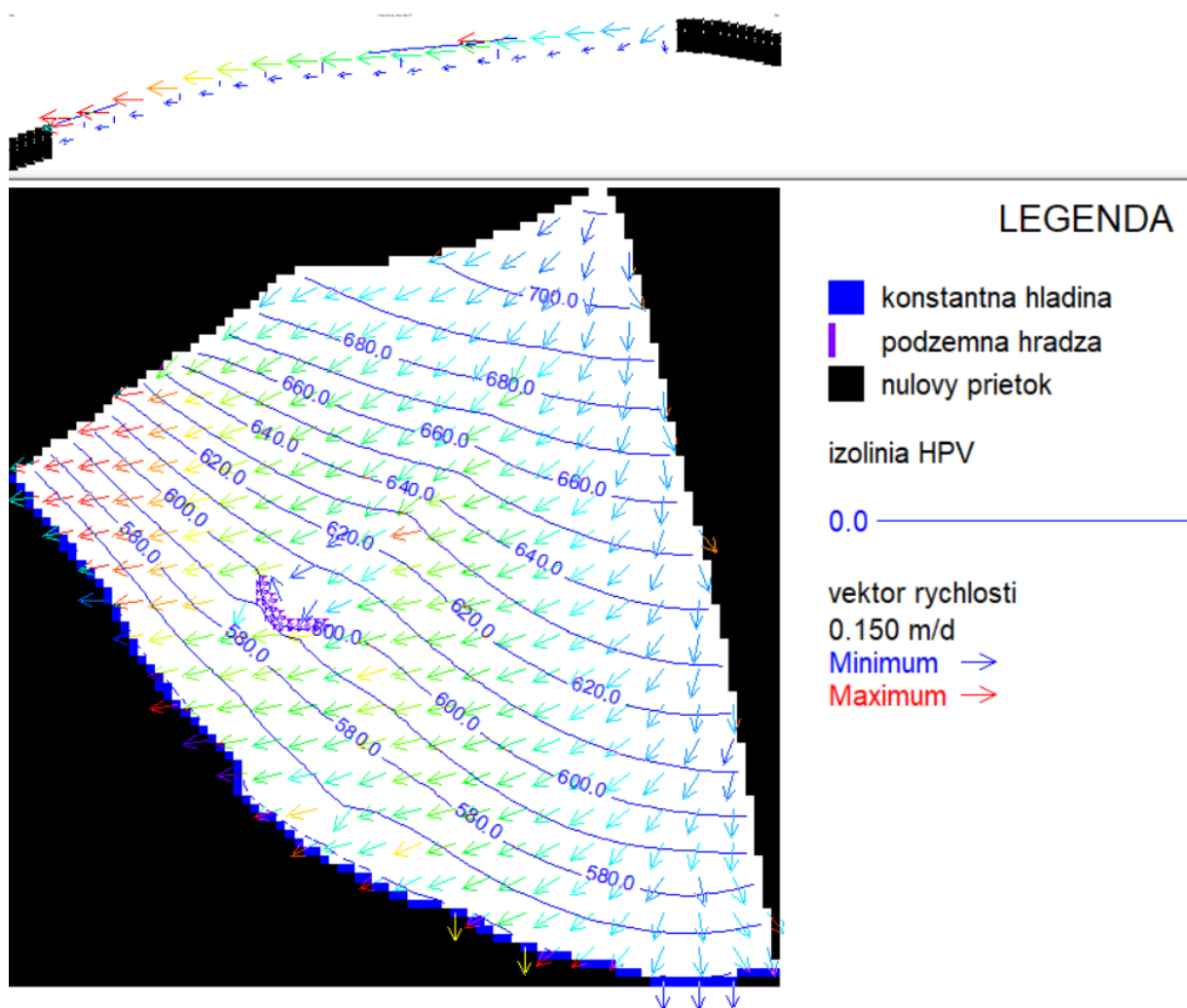
hodnota čerpania/prietoku	čerpací vrt pred hrádzou	drenáž pred hrádzou na bázy 1. a 2. vrstvy	drenáž pred hrádzou 0,5 m pod terénom
m ³ /deň	5,6	5,37	4,6
l/s	0,0648	0,0622	0,0532

Tab. 17.: Výsledky maximálneho čerpania z akumuláciej oblasti pred hrádzou a prietoky drenážnymi vývodmi v zadaných výškach.

V ďalšom výstupe je potom možné vykreslenie vektorov rýchlosti prúdového poľa v modeli. Predtým sme ale museli určiť a zadať hodnotu efektívnej (drenážnej) pórovitosti, ktorá predstavuje objem pórov, ktorými je voda schopná prúdiť pôsobením gravitačnej sily. Zohľadňuje sa tu teda efekt kapilárne viazanej vody. Hodnoty boli pre jednotlivé vrstvy prevzaté z priemerných tabuľkových údajov pre zrovnateľné materiály v práci od Morrisa a Johnsona (1967) a Beara (1979).

vrstva	n_{ef}	popis
1	0,2	piesky až piesčité íly, elúvium metamorfítov
2	0,08	tektonicky porušené horniny kryštalinika
3	0,0000001	pevná, súdržná hornina

Tab. 18.: Zadané hodnoty efektívnej pórovitosti pre určenie stredných (efektívnych) hodnôt rýchlosti „ v_{ef} “ ($v_f / n_{ef} = v_{ef}$ a vykreslenie ich vektorov), v_f – filtračná („darcyovská rýchlosť“)



Obr. 32.: Mapa vektorov rýchlosti (smerov prúdenia) v druhej variante s hrádzou za ustáleného stavu na škále od tmavomodrej (0,01 m/deň), k červenej (0,15 m/deň).

12.3. Dynamický model pre 2. variantu povodia

12.3.1. Popis konceptu, nastavenia parametrov a okrajové podmienky

Z druhej, vzhľadom na drenážnu hranicu vhodnejšej varianty bola nasimulovaná jednoduchá situácia, pri ktorej dôjde k vypnutiu zrážok, a tým sa modelové prostredie začne odvodňovať až po určitom čase vyschne. Riešenie spočívalo v celkovo dvoch stresových obdobiach. Prvé predstavuje simuláciu v ustálenom režime s hrádzou. Pre tento statický model bol zvolený 1 časový krok v dĺžke 10 dní. Po ňom nasleduje druhé stresové obdobie, ktoré je premenné s časom. Pri ňom bolo nastavených 20 časových krokov v celkovej dĺžke, ktorá bola v priebehu simulácie menená, kým nepoklesla hladina v pozorovacom vrte pod úroveň 578,5 m n.m., ktorá v tomto bode predstavuje hranicu podložia (12 m pod terénom). Pre model v dynamickom režime je nutné nastaviť časovo premennú okrajovú podmienku. V tomto prípade je jedinou vhodnou podmienkou pre tento účel hydraulická výška na drenážnej hranici. V nastaveniach okrajovej podmienky konštantnej hladiny pre 1. a 2. vrstvu bol vypnutý ustálený (statický) režim – „steady-state“ a tým pádom prepnutá na prechodný (dynamický) režim – „transient“.

Pre dynamický model je taktiež potrebné nastaviť objemovo – kapacitný hydraulický parameter prostredia, ktorý v tomto prípade predstavuje pre jednotlivé vrstvy špecifickú storativitu (S_s), teda objem vody, ktorý sa uvoľní z jednotkového objemu prostredia pri jednotkovom znížení piezometrickej / hydraulickej výšky. Táto hodnota bola prevzatá z reprezentatívnych hodnôt z webu http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm, vychádzajúcich z práce od Batua (1998).

Taktiež bola do modelu zadaná hodnota voľnej storativity (S_y) pre vrstvu 1. Voľná storativita pre prvú vrstvu bola prevzatá z publikácie od Johnsona (1967), Beara (1979) a predstavuje priemernú hodnotu medzi piesčitými ílmi a stredno-zrnnými pieskami na rade meraných vzorkov.

Následne, do oblasti priamo za hrádzou vedľa bunky pridaného čerpaceho vrtu bol umiestnený monitorovací vrt, z ktorého bol po simulácii odčítaný počet dní kedy hladina vody klesla pod spodnú hranicu 2. vrstvy (578,5 m n.m.), teda na zamýšľané nepriepustné podložie.

Pre porovnanie účinku hrádze potom simulujeme oblasť bez hrádze, s pridaním hrádze s rovnakými parametrami ako v ustálenom (neovplyvnenom) stave, a s hrádzou aj čerpacím vrtom o výdatnosti, ktorá bola v predchádzajúcej časti zvolená ako maximálna možná pre udržateľnosť stálej hladiny v kolektore bez jeho prečerpania.

Modelová vrstva	Ss (špecifická storativita) – m ⁻¹	Sy (voľná storativita – „specific yield“) – bezrozmerná
1.	0,000166	0,165
2.	3,609*10 ⁻⁵	-
3.	1*10 ⁻⁹	-

Tab. 19.: Zadané hodnoty špecifickej storativity + voľnej storativity pre prvú vrstvu.

Program pre prvú vrstvu berie hodnotu voľnej storativity, keďže je v nastavení modelu braná ako vrstva typu 0 – s voľnou hladinou. Pre spodné 2 vrstvy, puklinovú a podložnú bola priradená hodnota špecifickej storativity určenú pre napäté zvodne.

V literatúre je častokrát voľná storativita ekvivalentným pojmom k efektívnej / drenážnej pórovitosti. Hodnota voľnej storativity je teda rovnaká, alebo približne odpovedá efektívnej / drenážnej pórovitosti materiálu.

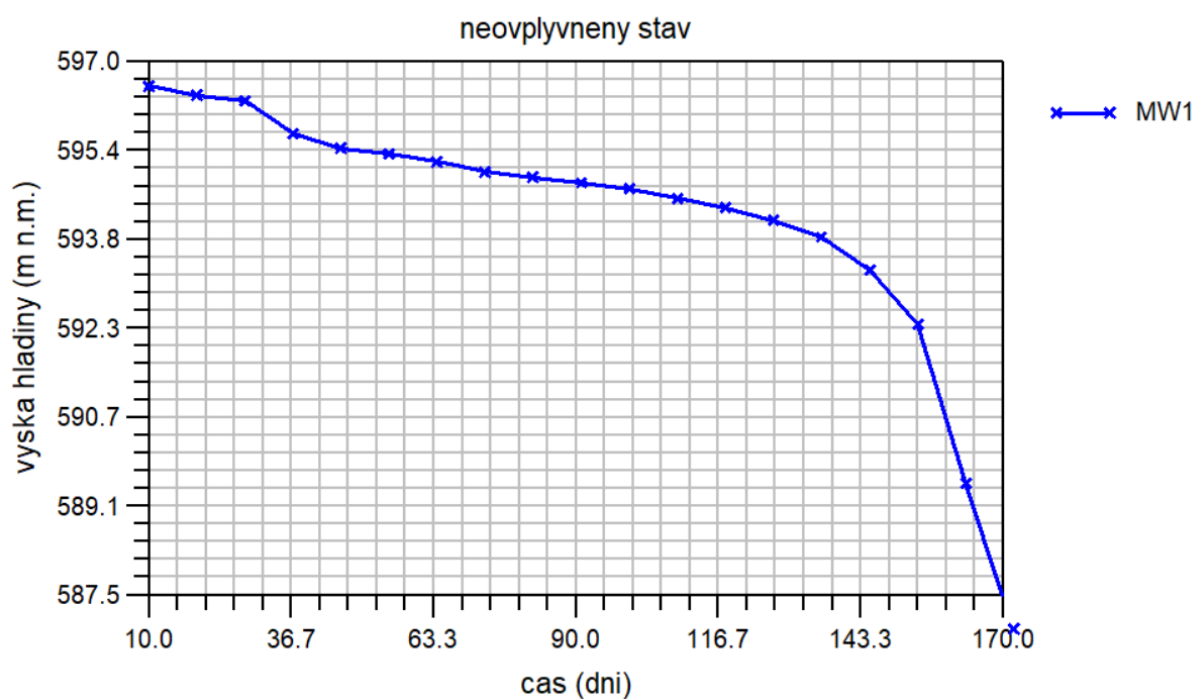
12.3.2. Výsledky a výstupy modelu

Nasledujúca tabuľka poukazuje na mieru účinnosti hrádze v suchom období po vypnutí zrážok v druhom (prechodnom) stresovom období.

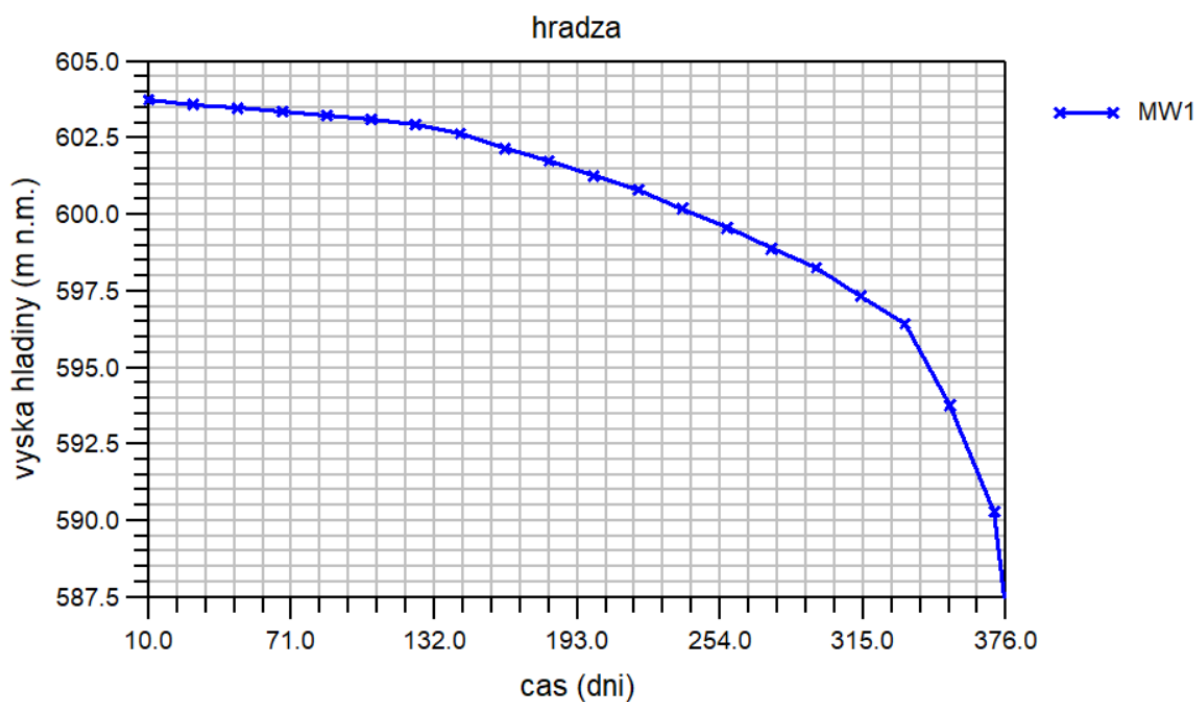
modelová situácia	prirodzený stav	hrádza	hrádza + čerpací vrt (5,6 m ³ /deň)
počet dní do vysušenia kolektoru pred hrádzou	160	366	180

Tab. 20.: Tabuľka výsledkov dynamického modelu.

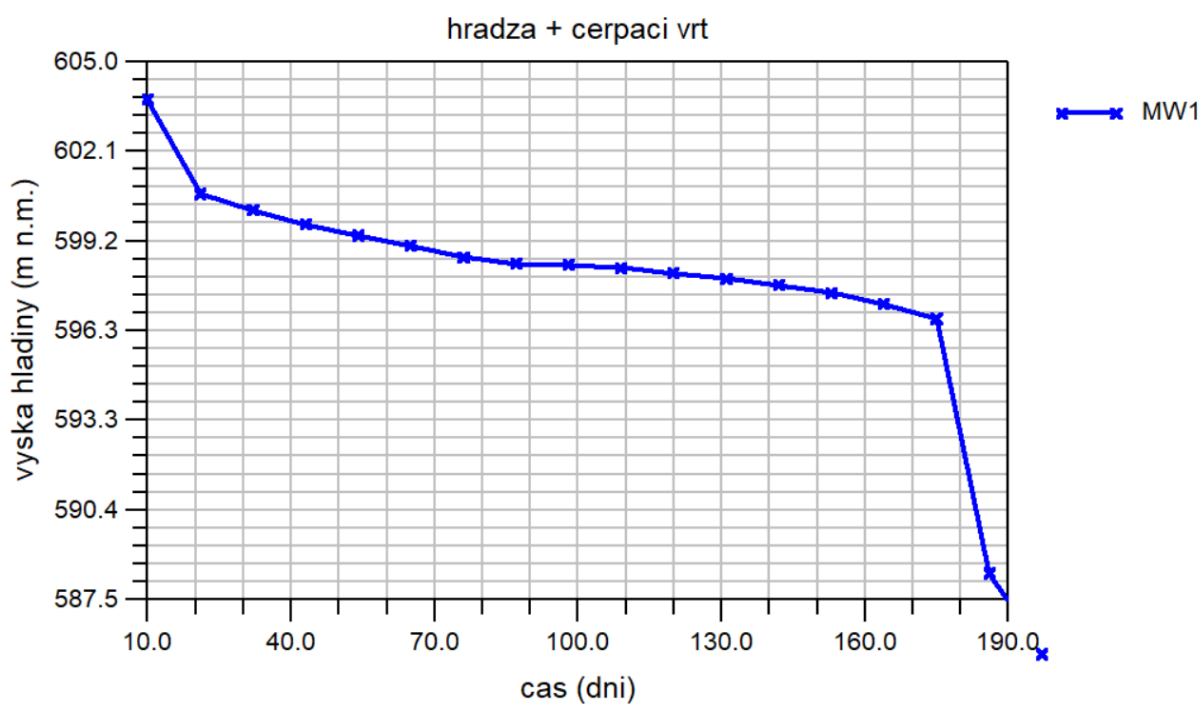
Výsledky sú zhrnuté taktiež v grafoch priebehu hladiny dynamickej simulácie od 10 dňového ustáleného režimu. Tie boli na ypsilonovej osy nastavené na hodnotu 587,5 m, ktorá predstavuje úroveň podložia v mieste monitorovacieho vrtu, keďže jeho nadmorská výška (úrovne terénu) je +- 599,5 m n.m.



Graf 17.: Priebeh hladiny v monitorovacom vrte v neovplyvnenom stave (bez hrádze).

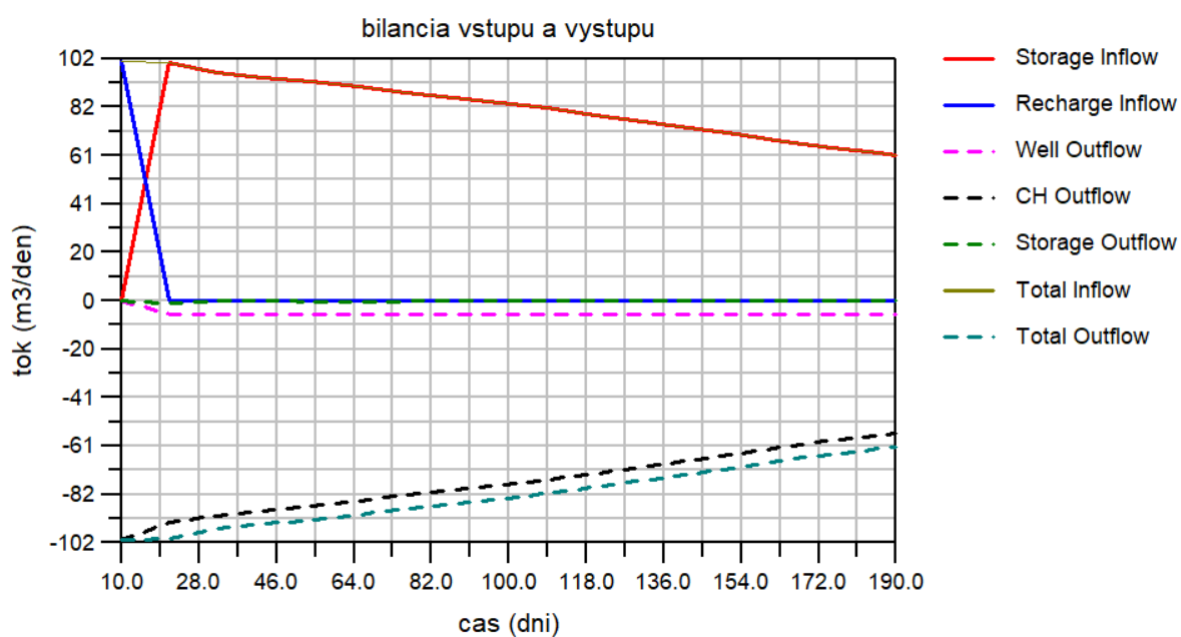


Graf 18.: Priebehu hladiny v monitorovacom vrte cca. 20 m pred hrádzou na návodnej strane.



Graf 19.: Priebeh hladiny v monitorovacom vrte pred hrádzou po pridaní čerpaceho vrtu s odberom 5,6 m³/deň.

Na záver je graf celkovej bilancie modelu po vložení hrádze a s čerpacím vrtom.



Graf 20.: Bilancia prítoku a odtoku z modelu behom simulácie bezzrážkového obdobia s hrádzou a čerpacím vrtom.

12.4. Model podľa najnovšieho technického projektu

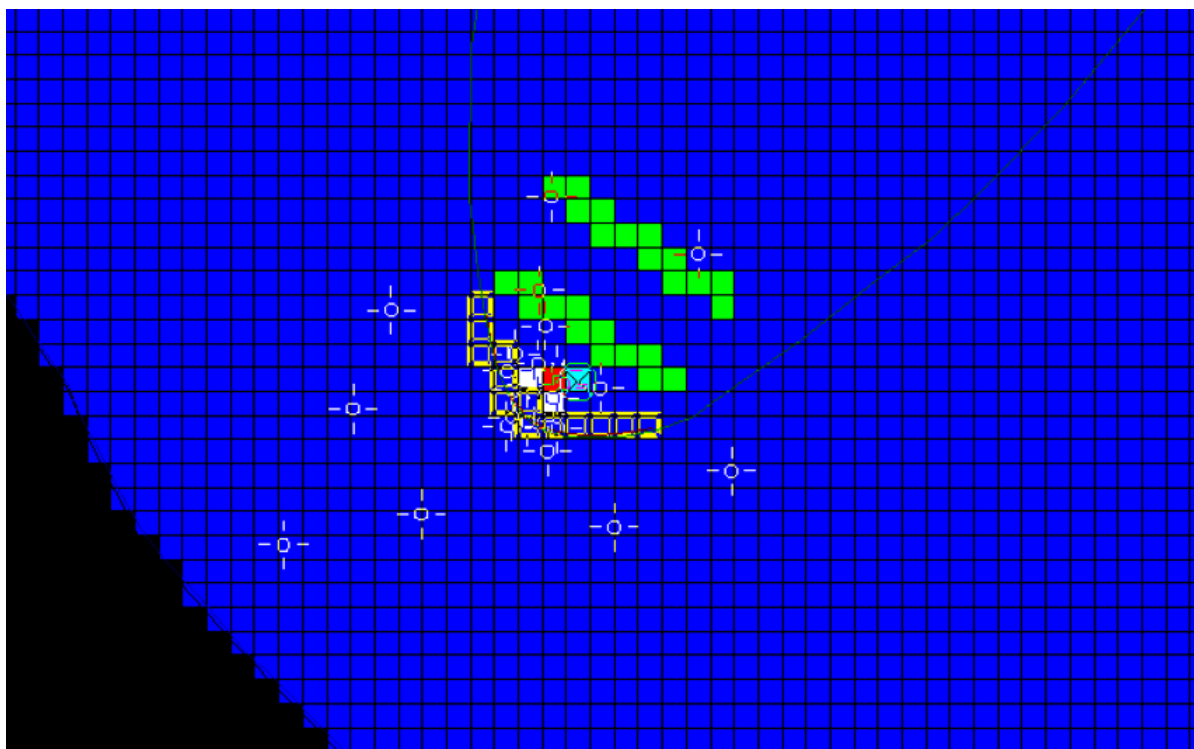
Pre druhú variantu, ktorá predstavuje najmä z hľadiska návrhu oblasti povodia reprezentatívnejší model bola nasimulovaná situácia podľa nového technického projektu, ktorý bol predložený zhruba 3 týždne pred odovzdaním diplomovej práce na konci júla 2019.

12.4.1. Koncept a nastavenie parametrov pridaných prvkov

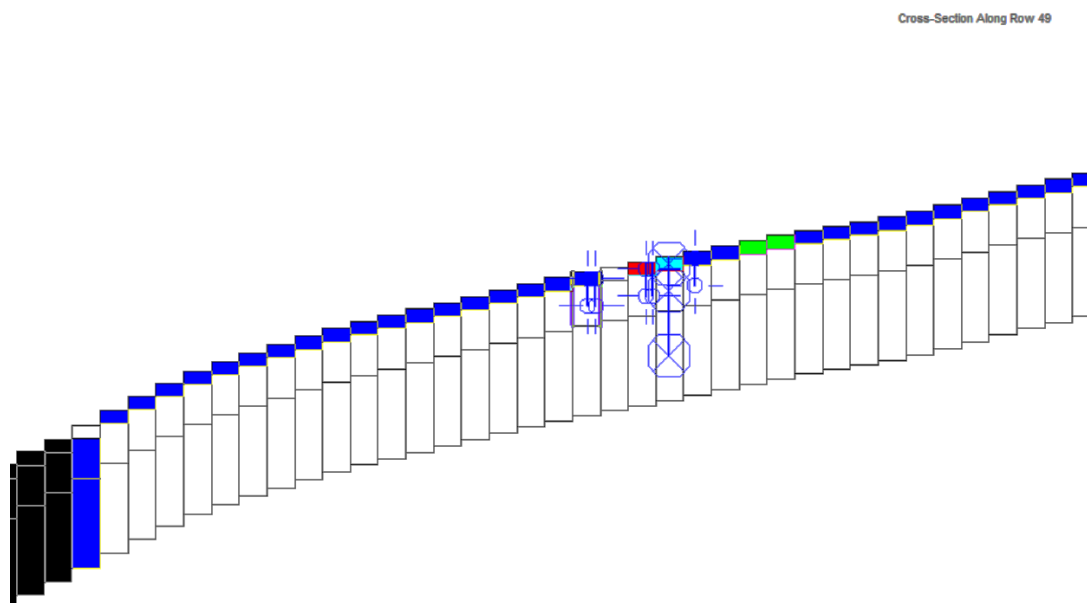
Model teda vychádza z druhej varianty povodia a obsahuje 2 hlavné zmeny. Prvou je prítomnosť perforovanej akumuláčnej nádrže s obsypom hrubozrnnnej frakcie (štrku), ktorá bude hneď pred telesom hrádze na návodnej strane. Druhá predstavuje dve infiltračné rýhy zhruba 25m a 50m od telesa hrádze kolmo na predpokladaný smer prúdenia podzemnej vody. Keďže hĺbka založenia akumuláčnej šachty s obsypom je 5 až 6 m pod terénom v modeli sa nastavili vyššie hydraulické vodivosti pre prvú aj druhú vrstvu. Pre prvú vrstvu bola nastavená v oblasti nádrže s obsypom hydraulická vodivosť odpovedajúca hrubozrnným pieskom až štrkom – $3 \cdot 10^{-4}$ m/s (25,92 m/deň). Pre druhú potom z dôvodu mocnosti vrstvy a vzhľadom na to, že nádrž s obsypom bude siahať zhruba do 1/3 modelovej vrstvy bola nastavená priepustnosť nižšia o jeden rád a to $5,79 \cdot 10^{-5}$ m/s (5 m/deň). Pre nasimulovanie účinku infiltračných rýh bola v líniach plánovaných infiltračných rýh zmenená hodnota zrážok, resp. infiltrácie (v programe „Recharge“) na hodnotu 0,00102 m/deň, ktorá predstavuje 50% c celkových zrážkových úhrnov za ustáleného stavu. Tým sa zvýši dotácia vody do prostredia v infiltračných rýhach.

Úprava dotácie zo zrážok v infiltračných rýhach	m/deň
50% z celkových zrážok	0,00102

Pre túto variantu boli spravený výpočet ako v ustálenom režime, tak aj dynamickom takisto pri nasimulovaní bezzrážkového obdobia.



Obr. 33.: Pridané pomocné prvky v prvej vrstve modelového gridu (červená – čerpací vrt, biela - infiltračná nádrž s obsypom, zelená – infiltračné rýhy, tyrkysová – monitorovací vrt, modrá – oblasť infiltrácie zo zrážok)



Obr. 34.: Pridané pomocné prvky prvej vrstvy v reze modelu.

12.4.2. Stacionárny model.

Rozdielové údaje, ktoré by mohli rozhodovať o miere efektívnosti daného riešenia sú zhrnuté v prvom rade pre ustálený stav a následne potom aj pre dynamický model.

Hlavné bilančné hodnoty modelu nižšie :

2. varianta - infiltračné rebrá a nádrž.

plocha povodia = 0,483 km²

prítok = 101,15 m³/deň

odtok bez hrádze = 100,97 m³/deň

percentuálna chyba bez hrádze = 0,18 %

špecifický základný odtok = 2,42 l/s⁻¹km⁻²

odtok s hrádzou = 102,03 m³/deň

percentuálna chyba bilancie s hrádzou = 0,87 %

okrajová podmienka – H = 558 m n.m. (na vrstevnici 560 m n.m.)

Po spustení takto upraveného modelu s telesom hrádze sme dostali výsledky za ustáleného stavu. V nich boli pre reprezentatívne porovnanie s 2. variantou bez infiltračných prvkov vybrané výšky hladín v 4 monitorovacích vrtoch M1 – M4. Zhrnutie je v nasledujúcej tabuľke.

Pozorovací vrt	Pozorovaná HPV (m)	Neovplyvnený stav (m)	S hrádzou + ryhy (m)	Reziduál prirodzený stav (m)	Reziduál s hrádzou (m)	Rozdiel hladín (m)
M1	583,48	589,92	587,72	6,44	4,24	-2,2
M2	589,14	589,53	584,32	0,39	-4,81	-5,2
M3	592,77	593,8	605,34	1,03	12,57	11,54
M4	594,64	595,63	604,62	0,99	9,98	8,99

Tab. 21.: Zhodnotenie rozdielov meraných (pozorovaných hladín) s modelovými po pridaní pomocných prvkov.

Oproti rozdielovým modelovým hodnotám vo variante bez infiltračných prvkov je viditeľný nižší pokles hladín za hrádzou (vrty M1 a M2) ako aj zdvihnutie hladiny na návodnej strane hrádze (M3 a M4, napr. v prípade M3 o 1,39 m). Pre lepšiu predstavu účinku infiltračných rýh a nádrže je potom nasimulovaný vrt v rovnakom bode ako v predchádzajúcich prípadoch, ktorý v tomto prípade spadá do telesa akumuláčnej nádrže. Metódou pokus-omyl sa potom sledovala maximálna výdatnosť vrtu pre čerpanie bez vysušenia 2 vrstvy v jeho okolí. Takisto bola pridaná okrajová podmienka voľnej drenáže a to pre celú mocnosť kolektoru (1. aj 2. vrstvu), ako aj pre prípad, ktorý vychádza z technického riešenia. Ten uvažuje drén vody tesne pod terénom cez teleso hrádze z akumuláčnej nádrže do kontrolnej šachty a ďalej spádom dole po svahu. V tomto prípade bola teda drenáž nastavená 0,5 m pod úrovňou terénu. Výsledky čerpania a prietoku drenážnymi vývodmi v tabuľke nižšie (tučne).

Neovplyvnené čerpanie bez hrádze je v prostredí so samostatnými pridanými prvkami : 7,2 m³/deň a bez pridaných prvkov z predchádzajúcej varianty : 4,2 m³/deň

hodnota čerpania/prietoku	čerpací vrt pred hrádzou	drenáž pred hrádzou na bázy 1. a 2. vrstvy	drenáž pred hrádzou 0,5 m pod terénom
m ³ /deň (bez nádrže + rýh)	5,6	5,37	4,6
l/s (bez nádrže + rýh)	0,0648	0,0622	0,0532
m ³ /deň	9,85	6,43	6,03
l/s	0,114	0,074	0,070

Tab. 22.: Hodnoty možného čerpania z prostredia a prietoku drenážnou podmienkou v danej úrovni pre najnovší technický projekt (tučne).

Z výsledkov čerpania a prietoku drenážou sa ukázalo, že oproti prvému prípadu sa množstvo čerpanej a drénovanej vody v oboch prípadoch zvýšilo. Najmä na úrovni čerpania došlo k výraznému navýšeniu oproti prípadu bez akumuláčnej nádrže a infiltračných rýh.

12.4.3. Dynamický model.

Pre novú variantu technického riešenia bol nasimulovaný aj stav, ktorý je bližšie komentovaný v kapitole 12.3. Jedná sa o bezzrážkové obdobie a sledovanie poklesu hladiny v monitorovacom vrte tesne pred hrádzou. Následne bol odvodený počet dní, za ktoré dôjde k vysušeniu 2. vrstvy a teda poklesu hladiny pod 12 metrov v tomto vrte. 12 metrov predstavuje v koncepcii modelu nepriepustné podložie a je taktiež hĺbkou založenia hrádze.

Z výsledkov dynamického modelu možno pozorovať zvýšenie efektívnosti použitých pomocných prvkov, ktoré predstavujú infiltračné rýhy a akumulčná nádrž s obsypom pred hrádzou. Tie zvyšujú akumulčný priestor pre vodu a celkové percento infiltrovanej vody zo zrážok.

Z grafu vidno podobný priebeh krivky vyprázdňovania modelu ako v prípade 2. varianty bez pomocných prvkov a tým pádom aj podobný špecifický podzemný odtok, ktorého zníženie by malo byť jedným z hlavných dôvodov vybudovania hrádze a jej pozitívneho prínosu pre efektívne využitie podzemnej vody. Pozvoľnejšie klesanie vidno aj v prípade s pridaným čerpacím vrtom o rovnakej maximálnej výdatnosti ako v prípade 2. varianty bez pridaných prvkov ($5,6 \text{ m}^3/\text{deň} = 0,065 \text{ l/s}$).

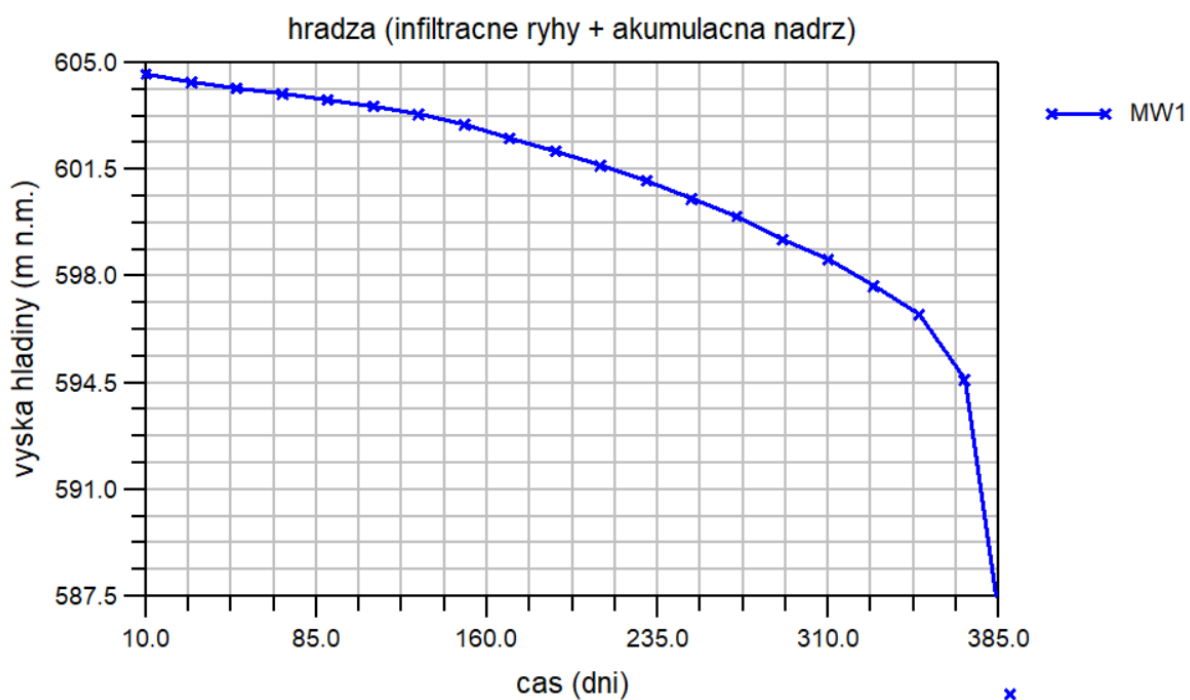
Počet dní pre vyprázdnenie zamýšľaného kolektoru (1. a 2. modelovej vrstvy) sa zdvihol z 366 dní na 375 dní bez čerpania a zo 180 dní na 191 dní s čerpacím vrtom. Tieto výsledky demonštrujú možnú mieru pozitívneho účinku pridaných infiltračných rýh a akumulčnej hrádze so štrkovým obsypom na dlhodobú udržateľnosť.

Do tohto modelu bola pridaná ďalšia hodnota voľnej storativity pre infiltračné a akumulčné prvky a to : 0,25. Tá predstavuje približnú hodnotu pre hrubozrnné štrky podľa Johnsona (1967) a Beara (1979).

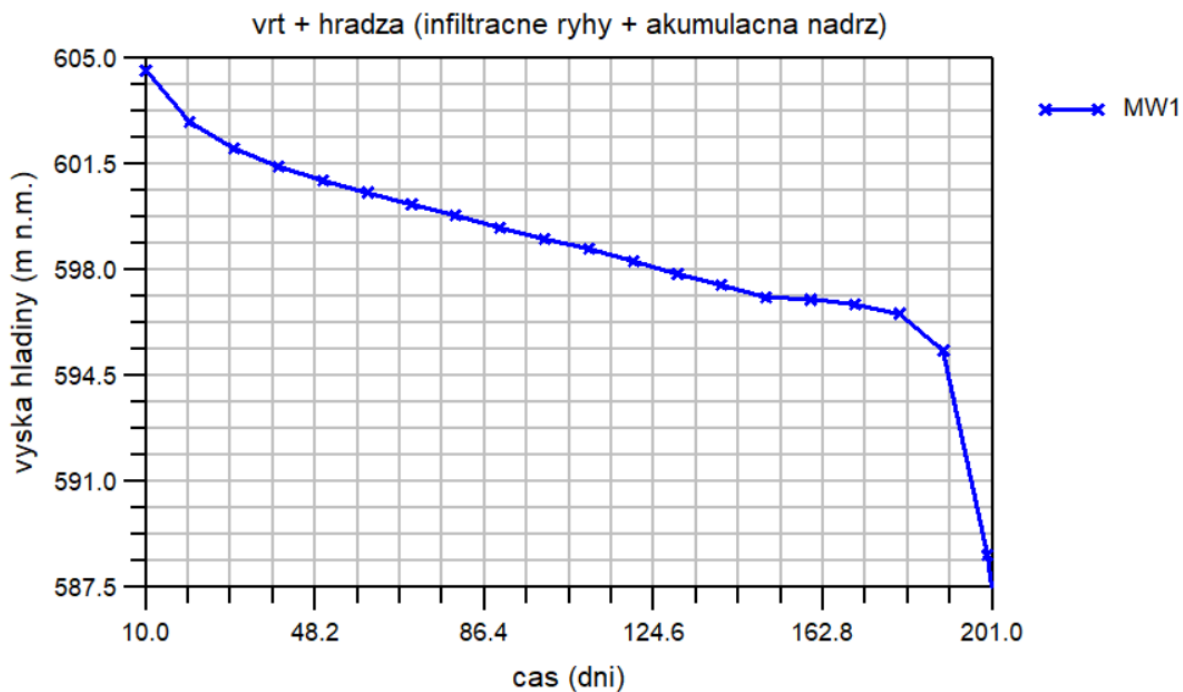
Výsledky ale samozrejme treba brať s rezervou, ako je komentované v diskusii a závere sú výstupy z modelu brané ako hrubo orientačné a závisia od kvality a počtu vstupných dát, resp. parametrov. V tomto prípade jeden z hlavných riadiacich parametrov – voľná a špecifická storativita bol odvodený z tabuľkových údajov.

modelová situácia	prirodzený stav	hrádza	hrádza + čerpací vrt (5,6 m ³ /deň)
bez pomocných prvkov	160	366	180
s infiltračnými rýhami a akumulacnou nádržou	160	375	191

Tab. 23.: Zhodnotenie dynamického modelu pre nový technický projekt a porovnanie so situáciou bez pomocných prvkov.

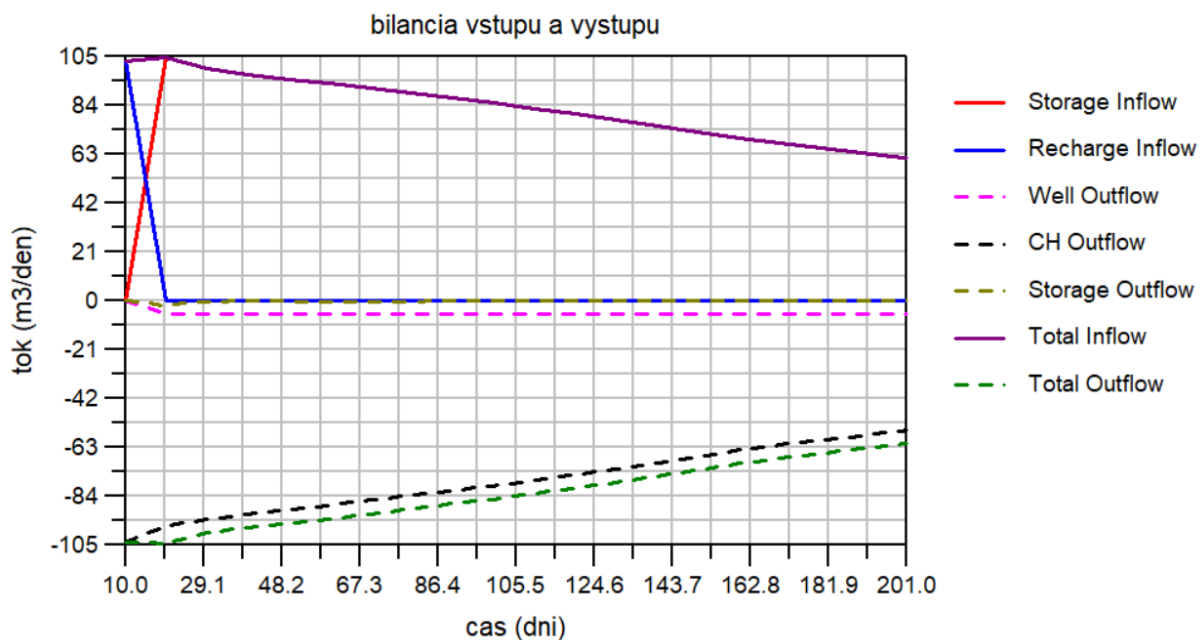


Graf 21.: Priebeh hladiny v monitorovacom vrte pred hrádzou bez čerpacieho vrtu.



Graf 22.: Pribeh hladiny v monitorovacom vrte pred hrádzou po pridaní čerpaceho vrtu s odberom $5,6 \text{ m}^3/\text{deň}$.

Na záver je graf celkovej bilancie modelu po vložení hrádzy a s čerpacím vrtom.



Graf 23.: Bilancia prítoku a odtoku do a z modelu počas simulovania dynamického bezzrážkového stavu.

13. Diskusia a zhrnutie výsledkov

Pre interpretáciou výsledkov daného modelového riešenia a ich možným priblížením realite je nutné byť značne kritický pre každý výstup modelu. V tomto prípade šlo o vcelku netypickú úlohu s pomerne malým povodím. Problémom týkajúcim sa kalibrácie modelu opierajúcim sa o reálne dáta je najmä malý plošný rozptyl vrto, v ktorých prebiehalo, alebo stále priebeha (v prípade štyroch monitorovacích vrto) meranie hladín. Tie aj napriek tomu vykazovali relatívne rozdielne výšky, čo v samotnom prírodnom prostredí predstavuje veľkú plošnú variabilitu a nejasnosť vo vymedzení podzemného odtoku, určení priebehu hladín a smerov prúdenia v okolí. Vzhľadom na túto skutočnosť je priemerný rozdiel meraných a modelových hladín vcelku uspokojivý. Pre vierohodnosť modelu sa každopádne vychádza z úzkeho vzťahu medzi sklonom svahu a hladiny podzemnej vody, resp. smermi prúdenia. Preto boli bázy jednotlivých vrstiev totožné s morfológiou povodia.

Samotný numerický model v tomto ohľade lepšie pracuje a interpretácia jeho výsledkov je vierohodnejšia pre panvové štruktúry, a v údolných nivách riek, kde sú parametre vzhľadom na mierkovú variabilitu prostredia presnejšie určené a možno lepšie kalibrovať model s reálnymi podmienkami.

Pomerne zaujímavý výstup na preukázanie účinku podzemnej hrádze je počet dní do vysušenia 2. vrstvy, ktorá v modeli predstavuje hlavný kolektor pod premenlivo nasýtenou pripovrchovou zónou. V tomto prípade bola porovnávaná situácia s prírodnými podmienkami a s hrádzou. Model s hrádzou bol spravený potom v dvoch variantách, a to bez pridaných prvkov, a podľa nového technického riešenia (pre pridanie pomocných infiltračných rýh a akumulácie perforovanej šachty).

Vo variante bez pridaných pomocných prvkov je zjavne viditeľný účinok samotnej hrádze oproti „prirodenému“, neovplyvnenému stavu, kedy z grafu priebehu hladiny vidno pomalší a postupnejší odtok vody najmä v prvých dňoch od vypnutia zrážok, teda nástupu dynamického („odvodňovacieho“) obdobia.

V druhej variante, kde by sa mal pozitívne odraziť účinok infiltračných rýh a akumulácie perforovanej nádrže s hrubozrnným obsypom je tvar krivky v prípade bez čerpania o niečo lepší, tzn. vzhľadom na efektivitu a zadržanie vody pred hrádzou.

Tabuľka počtu dní do vyschnutia 2. modelovej vrstvy, predstavujúcu hlavný kolektor nižšie :

modelová situácia	prirodzený stav	hrádza	hrádza + čerpací vrt (5,6 m ³ /deň)
bez pomocných prvkov	160	366	180
s infiltračnými rýhami a akumuláčnou nádržou	160	375	191

Ďalším predmetom diskusie je celková bilancia modelu a výstup v podobe odtoku cez drenážnu hranicu, kde je nastavená konštantná hydraulická výška. Z tohto pohľadu je výsledok špecifického základného odtoku, ktorý má modelovú hodnotu 2,38 l*s⁻¹km⁻², z pohľadu priemernej hodnoty pre kryštalinikum českého masívu pod priemerom (cca. 3 l*s⁻¹km⁻²). Podľa mapy základného odtoku podzemnej vody ČSSR (Krásný, Kněžek, 1982) je podzemný odtok v tejto oblasti určený ako „zvýšený“ (3 – 5 l*s⁻¹km⁻²). Treba však dodať, že sa jedna o pomerne svažité terén, kde sa hodnoty základného odtoku v kryštaliniku zvyšujú až do hodnôt okolo 7-8 l*s⁻¹km⁻², v extrémnych prípadoch horských oblastí potom až 15 l*s⁻¹km⁻². Z tohto pohľadu možno brať model a jeho výstupy ako podhodnotené. Každopádne pre model sú niektoré parametre a pridané prvky vzhľadom na veľkosť výpočetných buniek naopak nadhodnotené. To napríklad pridanie akumuláčnej nádrže a infiltračných rýh, ktoré sú v technickom projekte brané v 2 až 3 - krát menšom plošnom rozsahu.

Odtok z modelu a prepočet na špecifický odtok pre jednotlivé varianty v tabuľke nižšie :

Koncept modelu	odtok cez okrajovú podmienku		plocha povodia	špecifický odtok
	m3/deň	l/s	km2	l/s*km-1
1. varianta	94,36	1,0921	0,476	2,2944
1. varianta_drenáž	97,17	1,1247	0,476	2,3627
2. varianta	99,34	1,1498	0,483	2,3805
2. varianta_novy_tech	100,97	1,1686	0,483	2,4195

Výsledky odberu za konštantného čerpania môžeme pre zaujímavosť vzťahnúť na priemernú dennú spotrebu vody na obyvateľa. Tým dostaneme teoretický počet obyvateľov obce Meziboří, ktorí by mohli byť eventuálne zásobený vodou získanou výstavbou podzemnej hrádze

a jej pomocnými objektami. Priemerná denná spotreba vody na obyvateľa v Českej republike je okolo 100 l/deň. 1 m³ vody predstavuje 1000 litrov. Hodnoty odberu čerpaceho vrtu z predchádzajúcich výsledkov za ustáleného stavu a konštantného čerpania sú v priemere z varianty 1 a 2 – 5,6 m³/deň, a pre variantu s infiltračnými rýhami a nádržou s obsypom – 9,85 m³/deň. Vo výsledku to teda predstavuje odber 5600, alebo 9850 l/deň. Pri priemernej spotrebe by teda takto veľký odber vystačil na zásobovanie 56 obyvateľov v prípade výstavby hrádze bez pridaných infiltračných a akumulačných prvkov, a v druhom prípade pre cca. 98 obyvateľov s výstavbou infiltračných rýh pre efektívnejšie zasakovanie a akumulačnej nádrže pred hrádzou. Súhrnná tabuľka odberov za ustáleného stavu pre jednotlivé varianty nižšie :

VARIANTA	hodnota čerpania/prietoku	čerpací vrt pred hrádzou	drenáž pred hrádzou na bázy 1. a 2. vrstvy	drenáž pred hrádzou 0,5 m pod terénom
1.	m ³ /deň	5,4	5,18	4,16
1.	l/s	0,0625	0,06	0,048
1._drenáž	m ³ /deň	5,8	5,16	4,54
1._drenáž	l/s	0,0671	0,0597	0,0525
2.	m ³ /deň	5,6	5,37	4,6
2.	l/s	0,0648	0,0622	0,0532
2._nádrž + rýhy	m ³ /deň	9,85	6,43	6,03
2._nádrž + rýhy	l/s	0,114	0,074	0,070

Hodnota drenáže tesne pod terénom, v tomto prípade 0,5 m pod povrchom terénu nám určuje koľko vody by trebalo odvieť do samostatnej nádrže a uschovať, aby nedošlo k zaplaveniu terénu nad hrádzou. Priemer výsledkov z 1 a 2 varianty je 4,3 m³/deň a pre variantu s infiltračnými rýhami potom 6,03 m³/deň. Bez ďalšieho prečerpania, alebo drenáže vody pre ďalšie využitie by bola za 1 mesiac odberu vody z návodnej strane hrádze potrebná nádrž o objeme 130 m³ (130 000 litrov) v prvom prípade a v druhom o objeme 181 m³ (181 000 litrov).

Výsledné hodnoty sa môžu na prvý pohľad zdať vcelku vysoké avšak treba zohľadniť, že by sa jednalo o celkové množstvo využiteľnej vody pre zásobovanie obyvateľov, alebo iné účely. K tomuto výsledku treba ešte podotknúť fakt, že model je pre tento výstup riešený v ustálenom stave za nemenných zrážkových úhrnov, ktoré sa s časom samozrejme menia. Tie môžu mať, a častokrát majú nárazový charakter, prípadne môže nastať dlhšie obdobie bez zrážok. Z výsledkov možno usudzovať, že samotné rýhy a obsyp nádrže zefektívňujú mieru dotácie akumulačnej oblasti pred hrádzou a zvyšujú možné čerpanie podzemnej vody.

Celkové výsledky potom možno brať a porovnávať celkovo z dvoch hlavných aspektov, ktorými je prihliadané na efektívnosť hrádze.

1. na možné maximálne čerpanie z hrádze počas ustáleného režimu (dotáciou zrážok), a 2. na dlhodobú udržateľnosť zdroja podzemnej vody pred plánovaným telesom hrádze. V prvom prípade reprezentuje oproti ostatným variantám model podľa najnovšieho technického projektu značne vyššiu efektívnosť. Je však nutné previesť ďalšie stavebné zásahy a terénne úpravy, ktoré by ale v tomto prípade iba nepatrne navýšili celkovú cenu realizácie.

Samotnú dôveryhodnosť modelu môže zvyšovať fakt, že je riešený vo viacerých variantách (celkovo 4 varianty). Preto môžu byť výstupy, z každého konceptu porovnávané a prípadne vynesené ich priemer, ktorý bude predstavovať najreálnejšiu hodnotu daného sledovaného parametra.

Z hľadiska finančnej a časovej náročnosti, ktorú dané technologické riešenie predstavuje a pri prípadnej väčšej, či menšej zhode výstupov modelu s reálnymi podmienkami po vybudovaní hrádze sa tento projekt javí ako vcelku nerentabilný. V celkovom navrhovanom rozpočte, ktorý zahŕňa terénne úpravy, vybudovanie hrádze a všetky ostatné stavebné zásahy – cca. 12 000 000 Kč. sa navýšenie maximálneho čerpania oproti prírodnému stavu o 1,4 – 1,7 m³/deň nezdá celkom efektívne. Avšak z iného pohľadu pri prepočte na litre je 1400 – 1700 litrov dostatočné množstvo na zásobenie 14 – 17 obyvateľov k priemeru na dennú spotrebu vody (100 l/deň), takto braný údaj ukazujúci možnú výnosnosť pre samotný projekt sa nezdá byť až takým kritickým ukazovateľom. Tu je ale potrebné zdôrazniť, že sa jednalo o metodický experiment a ekonomické parametre neboli predmetom pre posúdenie celkového projektu. Pri aplikácii tejto technológie na povodie o ploche niekoľko km² by sme sa dostali do výrazne zaujímavejších čísel.

Na možnosť využitia vody spätným zasakovaním, odpadových vôd, alebo vôd z vodných tokov sa tento prípad nezdá tak efektívny, najmä vzhľadom na zvýšenie kvalitatívnych parametrov vody, ako je to napr. v prípade Vodného zdroja Káraný pri Prahe. A to hlavne z dôvodu veľkosti akumuláčného priestoru. Takisto aj filtračná schopnosť prostredia kryštalinika v krušných horách je pravdepodobne omnoho nižšia oproti štrkovo-piesčitém kvartérnym naplaveninám rieky Jizery. Vzhľadom na veľkosť daného povodia aj charakteru technologického riešenia sa však tieto dva prípady nedajú porovnávať v mnohých aspektoch.

14. Záver

Práca je zameraná na zhodnotenie efektivity a možnosti technológie umelého dopĺňania podzemnej vody do zvodne, ktorú predstavuje podzemná tesniaca hrádza. Príklad umelej infiltrácie v Meziboří je ambiciózny projekt, ktorý má predovšetkým experimentálnu povahu.

Cieľom práce bolo zistiť mieru efektivity takéhoto riešenia v prostredí hydrogeologického masívu na svažitom teréne.

Ako predpoklad miery účinku hrádze bol zhotovený numerický model. Simulácia prúdenia vody v prostredí, kde je jej charakter výrazne ovplyvnený priestorovým usporiadaním a priepustnosťou puklín býva zložitá úloha, a jej presnejší výstup je podmienený rozsahom dát, ktoré do modelu vstupujú, ako aj zvolenou metódou výpočtu. V tomto prípade vychádzal model zo spriemerovaných dát z terénnych meraní, ako aj prevzatých dát z literatúry.

Z výsledkov je zjavná vysoká miera ovplyvnenia kolektoru pred telesom hrádze a to najmä v stacionárnom (ustálenom) stave. Z následného riešenia dynamického stavu, kedy bola simulovaná situácia bez zrážok, a teda odvodňovanie kolektoru je takisto zjavný pozitívny účinok hrádze, kedy sa počet dní do vyschnutia kolektoru zvýšil viac ako 2 - násobne. Tieto výsledky však treba brať s ohľadom na celkový výstup modelu, resp. jeho bilančného súhrnu, z ktorého vyplýva nesúlad medzi predpokladaným priemerným základným odtokom v oblasti svažitého terénu kryštalinika a modelovým odtokom.

Výsledky a samotný model možno použiť na približný odhad účinku takéhoto zásahu do horninového prostredia pre prípadné budúce projekty, a aj ako praktickú ukážku pre prípadné zhotovenie modelu v podobnom návrhu, a poukázanie na možné nepresnosti a zjednodušenia takéhoto modelového riešenia vychádzajúce najmä zo vstupných dát.

Model možno brať ako experimentálny príklad, tak ako aj samotný projekt pre prípadné ďalšie riešené projekty s otázkou riadenej umelej infiltrácie ako nástroja pre elimináciu negatívnych dopadov klimatickej zmeny.

15. Zoznam použitej literatúry

- Abellán, A. J., Albaladejo-García, J. A., Prats-Rico, D. (2017) : Artificial groundwater recharge. Review of the current knowledge of the technique. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30 (1): 85-96.
- Asano, T. (1985) : Artificial Recharge of Groundwater. Butterworth Publishers, Boston, 767 p.
- Aquatest a.s. (2010) : Umělá infiltrace jako nástroj proti dopadu klimatické změny. Zpráva. 14 str.
- Batu, V. (1998) : Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis, John Wiley & Sons, New York, 727p.
- Bear, J. (1979) : Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, New York, 569p.
- Biswas, A. K. (2008) : Integrated Water Resources Management: Is It Working ?. *Water Resources Development*, 24 (1): 5–22
- Bouwer, H. (1989) : Estimating and enhancing groundwater recharge. In: Sharma ML (ed) *Groundwater recharge*. Balkema, Rotterdam, pp 1 10
- Bouwer, H. (1999) : Artificial recharge of groundwater : systems, design and management. In: Mays LW (ed) *Hydraulic design handbook*. McGraw-Hill. New York. pp 24.1 24.44
- Bouwer, H. (2002) : Artificial recharge of groundwater : Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, Volume: 10, Issue: 1, Pages: 121–142.
- Brainerd, R. J., Robbins, G. V. (2004) : A Tracer Dilution Method for Fracture Characterization in Bedrock Wells, *Ground Water* 42, no. 5: 774-780
- Bruthans, J., Lanzendörfer, M. (2018) : Limity numerického modelování pro určení zdrojů podzemní vody na současných případech z ČR. Univerzita Karlova. Praha. 8str.
- Custodio, E., Llamas, M. R. (1983) : *Hidrología Subterránea*, Tomo II, (OMEGA, Ed). Barcelona, 1194 p.
- Devine, R. S. (1995) : The trouble with dams. *Atlantic Monthly*. August 1995. pp 67-73
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J. C., Krishnamurthy, N. S. (2006): A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, str. 260-284.
- Dillon, P. (2005) : Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13 (1): 313–316
- FCIHS (2011) : *Recarga Artificial de Acuíferos*. International Center Foundation of Hydrogeology Press, 33 p.
- Fernández-Escalante, A. E. (2004) : *Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales: aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la cubeta de Santiuste (Segovia)*. Doctoral Thesis, Univ. Complutense of Madrid, 1331 p.
- Fernández-Escalante, A. E., García-Rodríguez, M. and Villarroja, G. F. (2005a) : Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo. *Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*, 3 (1): 1–24.

Foreman, T. L. (2014) : Managed Aquifer Recharge (MAR) and Design and Construction of Hydraulic Barriers against Seawater Intrusion: the California Case. *Boletín Geológico y Minero*, 125 (2): 133–142

Galloway, D. L., Alley, W. M., Barlow, P. M., Reilly, T. E. and Tucci, P. (2003) : *Evolving Issues and Practices in Managing Ground-Water Resources. Case Studies on the Role of Science*. USGS. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey Press, 83 p.

Gale, I. (2005) : Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. *International Association of Hydrogeologists. Commission on Managed Aquifer Recharge*. Paris 30 pg.

Groundwater Dictionary (2019) : dostupné online -
https://www.dwa.gov.za/Groundwater/Groundwater_Dictionary/index.html?artificial_recharge.htm

Gur, E., Spuhler, D. (2019) : Sand Dams and Subsurface Dams. Internetový článok -
<https://sswm.info/sswm-solutions-bop-markets/improving-water-and-sanitation-services-provided-public-institutions-0/sand-dams-and-subsurface-dams>

Gustafsson, P. (1993) : SPOT satellite data for exploration of fractured aquifers in southeastern Botswana. In: Banks S, Banks D (eds) *Hydrogeology of hard rocks. Memoires, 24th Congress, Int. Association Hydrogeologists*, str. 562–576.

Harbaugh, A.W. (2005) : MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—The Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Havlíková, B. (2010) : Význam numerického modelování pro řešení kontaminace podzemních vod. Numerical modeling in groundwater contamination problems. *Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze*.

Herčík, L. (2008) : 40 let provozování umělé infiltrace v Káraném (1968-2008). *Sborník konference Pitná voda 2008*, s. 289-294. W&ET Team, Č. Budějovice 2008. ISBN 978-80-254-2034-8

Holubec, M. (2001) : Moderné technológie úpravy podzemných vôd. In: *Voda Zlín 2001. Sborník příspěvků V. mezinárodní konference. Zlín, 28.-29. března 2001. Zlín: Vodovody a kanalizace Zlín, a.s., s. 85-90.*

Hrkal, Z. (2010) : DU4 Návrh pilotních lokalit. MS VUV TGM Praha. 68 str.

Hrkal, Z. (2010b) : Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR - DU2 Rešerše literatury zabývající se problematikou umělé infiltrace.

Hrkal, Z. et al. (2010c) : DU3 Metodika hodnocení území České republiky z hlediska vhodnosti pro řízenou dotaci podzemních vod vodami povrchovými a možností umělé infiltrace vyčištěných odpadních vod a aplikace této metodiky na území ČR. MS VUV TGM Praha. 22 str.

Hrkal, Z., Beran A., Eckhardt P., Hrdinka T., Rozman D., Novotná E., Martínková M., Vizina A. (2016) : *Řízená umělá infiltrace. Závěrečná zpráva pro Ministerstvo životního prostředí*. 71 str.

Hydrology Project (2008) : Ministry of Water Resources, Government of India – online :
<http://hydrology-project.gov.in/Decision%20Support%20System%20Planning.html>

Chadha, D. K. (2003) : Z kapitoly 3 - "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage." NCC-IAH Publ. č.4.

Chandra, S., Dewandel, B., Dutta, S., Ahmed, S. (2010) : Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. *Journal of applied geophysics* 71, str.137–148

Charatišvili, L. A., Zedginidze, S. N. (1969) : Metodika opredelenija koeficienta vodoprovodivosti vodonosnych gorizontov v gornoskladčatych rajonach bez provedenija special'nych burovych i opytnych rabot. *Sov. Geol. (Moskva)*, 12,7. 125-128.

Chiang, W.H., Kinzelbach, W. : Processing Moflow Pro 7.0.18 – Manual. WebTech360, Inc. 2002-2003.

Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z. (2002) : *Geologická minulost České republiky*. 1. vyd., Academia Praha, ISBN 80-200-0914-0.

Jetel, J. (1997) : Metodické postupy hodnotenia priemernej prietochnosti a priepustnosti v horských oblastiach nepriamymi metódami. Manuskript - archív ŠGÚDŠ, Bratislava. 85s.

Jetel, J. (2002) : Hodnotenie priemernej pretočnosti a priepustnosti v horských územiach nepriamymi metódami. In: *Podzemná voda* č. 2, ročník 8

Johnson, A. I. (1967) : Specific yield - compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1662-D, 74pp.

Kachlík, V. (2003) : *Geologický vývoj území České republiky*, SURAO Praha, 65p.

Kněžek, M., Váša, J. (1970) : Teoretický a experimentální výzkum změn přirozeného režimu podzemních vod v jímacích oblastech část rezortní stude S-RS-30-143. Zhodnocení přírodních podmínek a technických možností pro umělou infiltraci. MS Výzkumný ústav vodohospodářský. Praha.

Konikow, L.F., Kendy, E. (2005) : Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13 (1): 317–32

Krásný, J., Kněžek, M. (1977) : Regional estimate of ground-water run-off from fissured rocks on using transmissivity coefficient and geomorphologic characteristics. *J. Hydrol. Sci. (Warszawa)* 4, 2, str. 149-159

Krásný, J., Kněžek, M. (1982) : *Odtok podzemní vody na území Československa*. Vyd. 1. Praha, 1982, 52s.

Krásný, J. (1996a) : State of the art of hydrogeological investigations in hard rocks: The Czech Republic. in *Hardroks Hydrogeology of the Bohemian Massif*. Acta Universitatis Carolinac, Geologica, Univerzita Karlova 40 (2), str. 89–101. ISSN 0001-7132

Krásný, J., Sharp, J. M. (2007) : Hydrogeology of fractured rocks from particular fractures to regional approaches: State-of-the-art and future challenges. In: Krásný J., Sharp J. M. (eds): *Groundwater in fractured rocks*, IAH Selected Papers 9, Taylor and Francis.

Krásný, J., Císlarová, M., Čurda, S., Datel, J. V., Dvořák, J., Grmela, A., Hrkal, Z., Kříž, H., Marszałek, H., Šantrůček, J., Šilar, J. (2012) : *Podzemní vody České republiky - Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. - Česká geologická služba. Praha. 1143 str.

Larsson, I. et al. (1987) : *Les eaux souterraines des roches dures du socle*. – UNESCO Études et rapports d'hydrologie 33.

Mapový portál Českej geologickej služby (2019) : Geologická mapa 1 : 50 000 na internetovej adrese : <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

- Maréchal, J. CH. (2003) : Vertical anisotropy of hydraulic conductivity in hard-rock aquifers. In Krásný J., Hrkal, Z., Bruthans, J. (eds) : Proceedings of the international conference on groundwater in fractured rocks: extended abstracts, 15-19 September 2003 Prague, Czech Republic. S.n.: International Association of Hydrogeologist xv., 426 str. ISBN 92-9220-002-x
- Megdal, S. B., Dillon, P. (2015) : Policy and Economics of Managed Aquifer Recharge and Water Banking. *Water*, 7 (2): 592– 598
- Milický, M., Uhlík, J. (2010) : DU 5 Návrh metodiky modelových řešení na pilotních lokalitách. Ukázka zpracování modelové lokality Káraný. PROGEO. Praha. 34 str.
- Mísař, Z., Dudek A., Havlena V. (1983) : Geologie ČSSR I., Český masív., SPN, Praha.
- Morris, D. A., Johnson, A. I. (1967) : Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-1960. USGS Water Supply Paper: 1839-D.
- Murray, E. C. (2004) : Wise water management for towns and cities. Water Research Commission, South Africa. (www.wrc.org.za) ISBN 1-77005-092-2.
- Muzikář, R. (2002) : Umělá infiltrace při sanaci podzemních vod. Internetový článek - <https://www.odpady-online.cz/umela-infiltrace-pri-sanaci-podzemnich-vod/>
- Nosek, J. (2009) : Laboratorní výzkum a modelování transportních vlastností nanoželeza. Doktorská disertační práce. TÚ Liberec, 151 str.
- Pulido-Bosch, A., Sbih, Y. B. (1995) : Centuries of Artificial Recharge on the southern edge of the Sierra Nevada. *Environmental Geology*. v.26. pp. 57-63.
- Raju, N. J. (2006) : Subsurface dams to harvest rainwater - A case study of the Swarnamukhi River basin, Southern India, in *Hydrogeology Journal* 14(4):526-531
- Rumbaugh, J. O., Rumbaugh, D. B.(2011) : Guide to Using Groundwater Vistas, Version 6. Environmental Simulations, Inc., Reinholds, PA, 221 pp
- Singhal, B. B. S. (1997) : Artificial recharge of groundwater in hard rocks with special reference to India IAHS Publ. no. 241, 11-12
- Sinha, B. P. C., Sharma, S. K. (1990) : Groundwater dams — concepts and case histories. *Bhu-Jal News* 5, 3-13
- Skalický, M. (2015) : Umělá infiltrace na lokalitě Káraný jako nástroj řešení nedostatku podzemní vody pro vodárenské využití – prezentace. Národní dialog o vodě 2015: „Retence vody v krajině“, Medlov.
- Sukhija, B. S., Reddy, D. V., Nagabhushanam, P., Bhattacharya, S. K., Jani, R. A., Kumar, D. (2006) : Characterisation of recharge processes and groundwater flow mechanisms in weathered-fractured granites of Hyderabad (India) using isotopes. *Hydrogeology Journal* 14, str. 663–674.
- Škvor, V. (1975) : Geologie české části Krušných hor a Smrčín. Praha : Academia, 119 str.
- Taylor, R., Howard, K. (2000) : A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: Evidence from Uganda. *Hydrogeology Journal* 8 (3), str. 279–294.

Tredoux, G., Murray, E. C., Cave, L. C. (2003) : From Chapter 8. Infiltration systems and other recharge systems in Southern Africa. "Management of Aquifer recharge and Subsurface Storage." NCC-IAH Publication. No. 4.

Tyler, S. W., Chapman, J.B., Conrad, S. H., Hammlenneister, D. P., Rlout, D. O., Miller, J. J., Sully, M. J., Ginanni, J. M. (1996) : Soil-water flux in the southern Great Basin. United States: Temporal and spatial variations over the last 120,000 years. *Water Resow Res* 32(6):1481-1499

Vacková, A. (2014) : Charakterizace hydrogeologického masivu na základě archivních vrtných prací a konceptuální model. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. 71 str.

Valentová, J. (2007) : *Hydraulika podzemní vody*. Nakladatelství ČVUT. Praha. 174 str. ISBN 978-80-01-03625-9.

Vrána, S., Štědrá, V. (1997) : Geological model of western Bohemia related to the KTB borehole in Germany. Czech Geological Survey. Praha. 240 pg.

Wyns, R., Gourry, J. C., Baltassat, J. M., Lebert, F. (1999) : Carcterisation multiparametres des horizons de subsurface (0–100 m) en contexte de socle altere'. In: I. BRGM, IRD, UPMC (Eds.), 2e`me Colloque GEOFCAN, Orléans, France, str. 105–110. In: Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C.

Yeh H.-D., Chang, Y.-C. (2013) : Recent Advances in Modeling of Well Hydraulics. *Advances in Water Resources*, vol. 51, str. 27- 51. Elsevier, 2012.

Young, D. M. (1950) : Iterative methods for solving partial difference equations of elliptical type. PhD thesis, Harvard University, retrieved 2009-06-15

Zajíček, V. (1970) : Umělá akumulace podzemních vod - studie. MS Výzkumný ústav vodohospodářský. Praha

Žáková, T. (2014) : Matematický model proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Praha. 75 str.

Iné internetové zdroje :

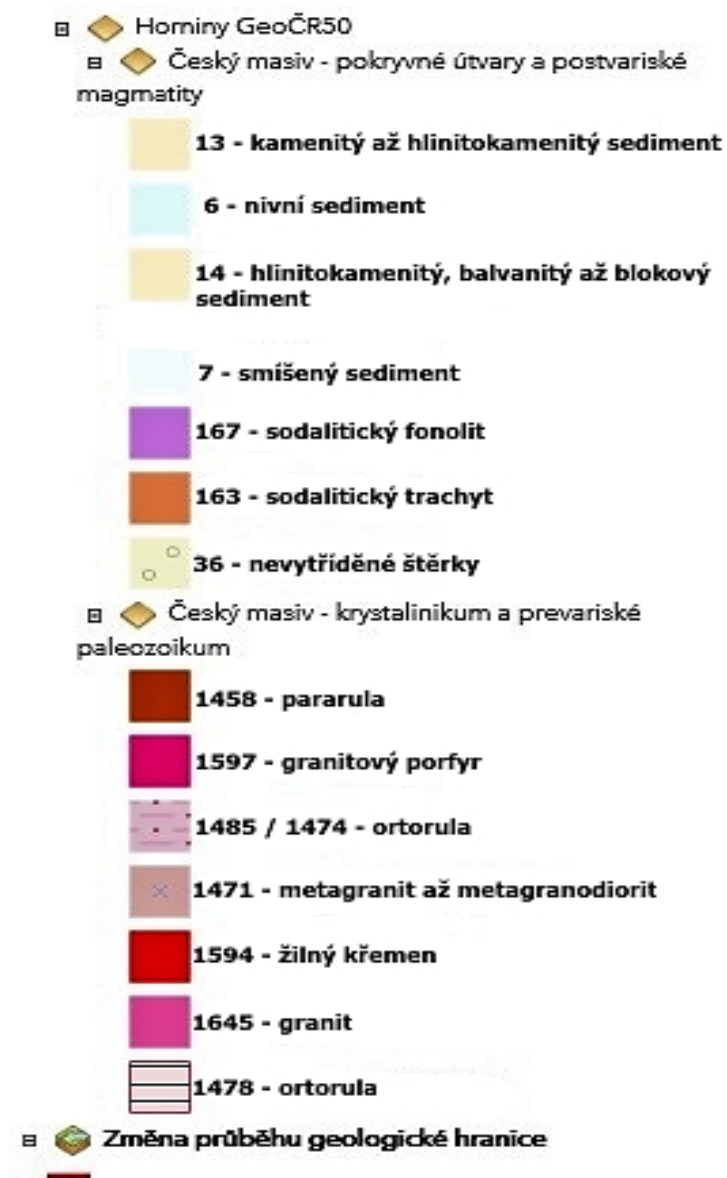
Server ČÚZK (2018) : <https://nahliznidokn.cuzk.cz/VyberKatastrMapa.aspx>

Server Mapy.cz (2018) : <https://mapy.cz/turisticka?x=14.4747000&y=50.0703000&z=11>

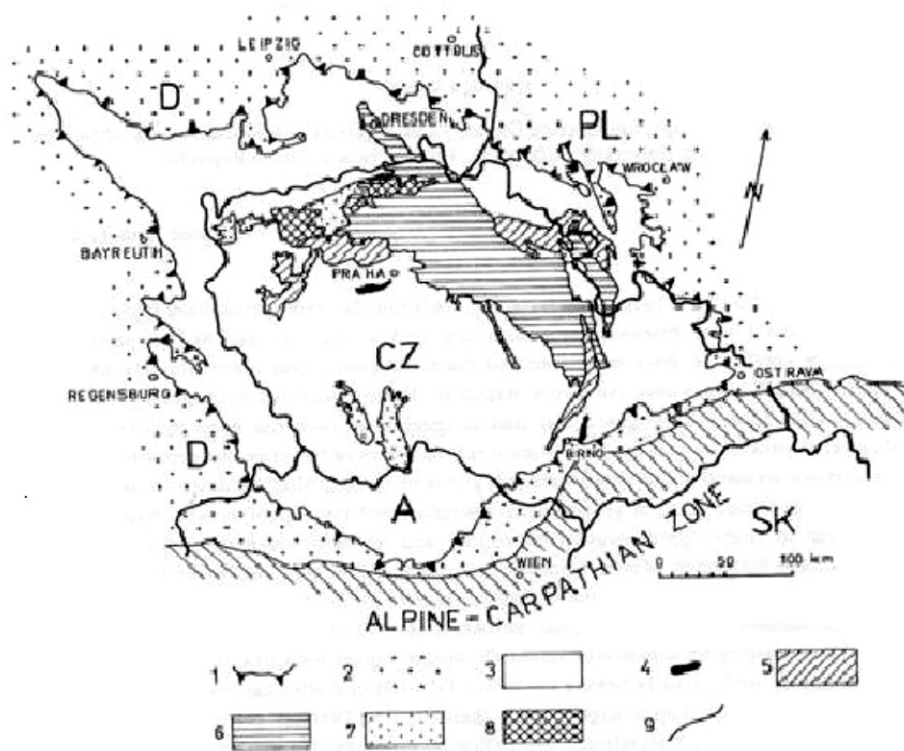
www.zpvkarany.cz/

chemizmus : http://www.geology.cz/app/povrch_vody/povrch_vody_map.pl?id=SB018

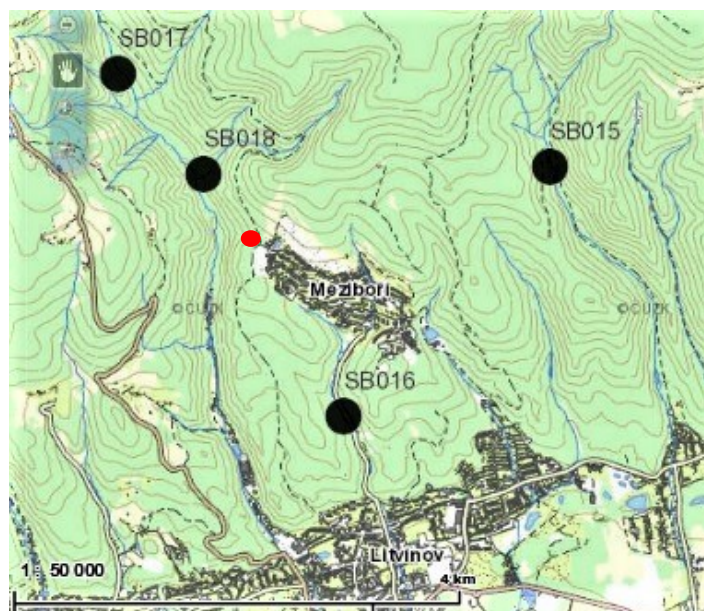
16. Prílohy



Príloha 1.: Legenda geologickej mapy sledovaného územia a jeho blízkeho okolia.



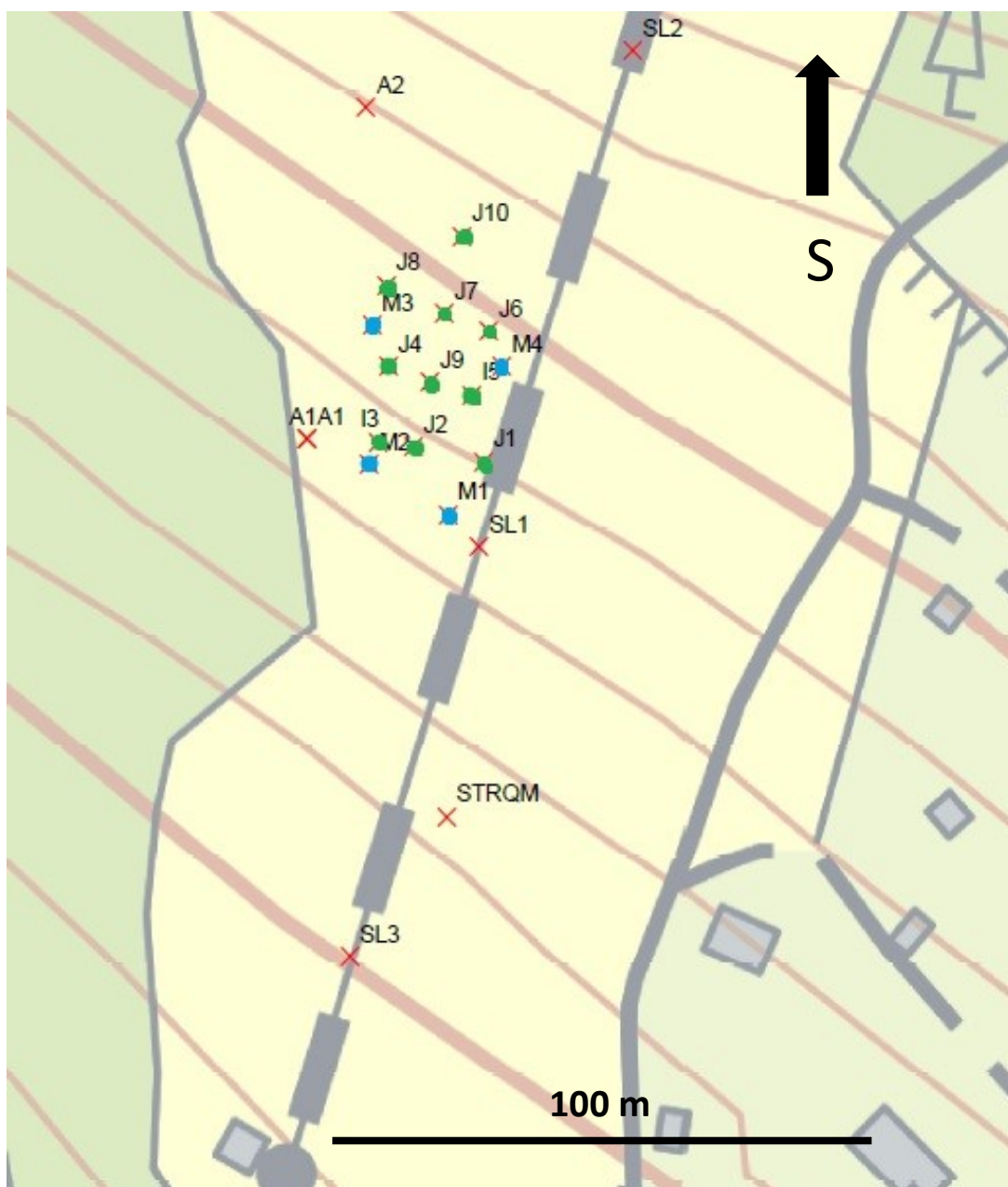
Príloha 2.: Znázornenie hornín hydrogeologického masívu v Českej republike a prihraničí (číslo 3 v legende).



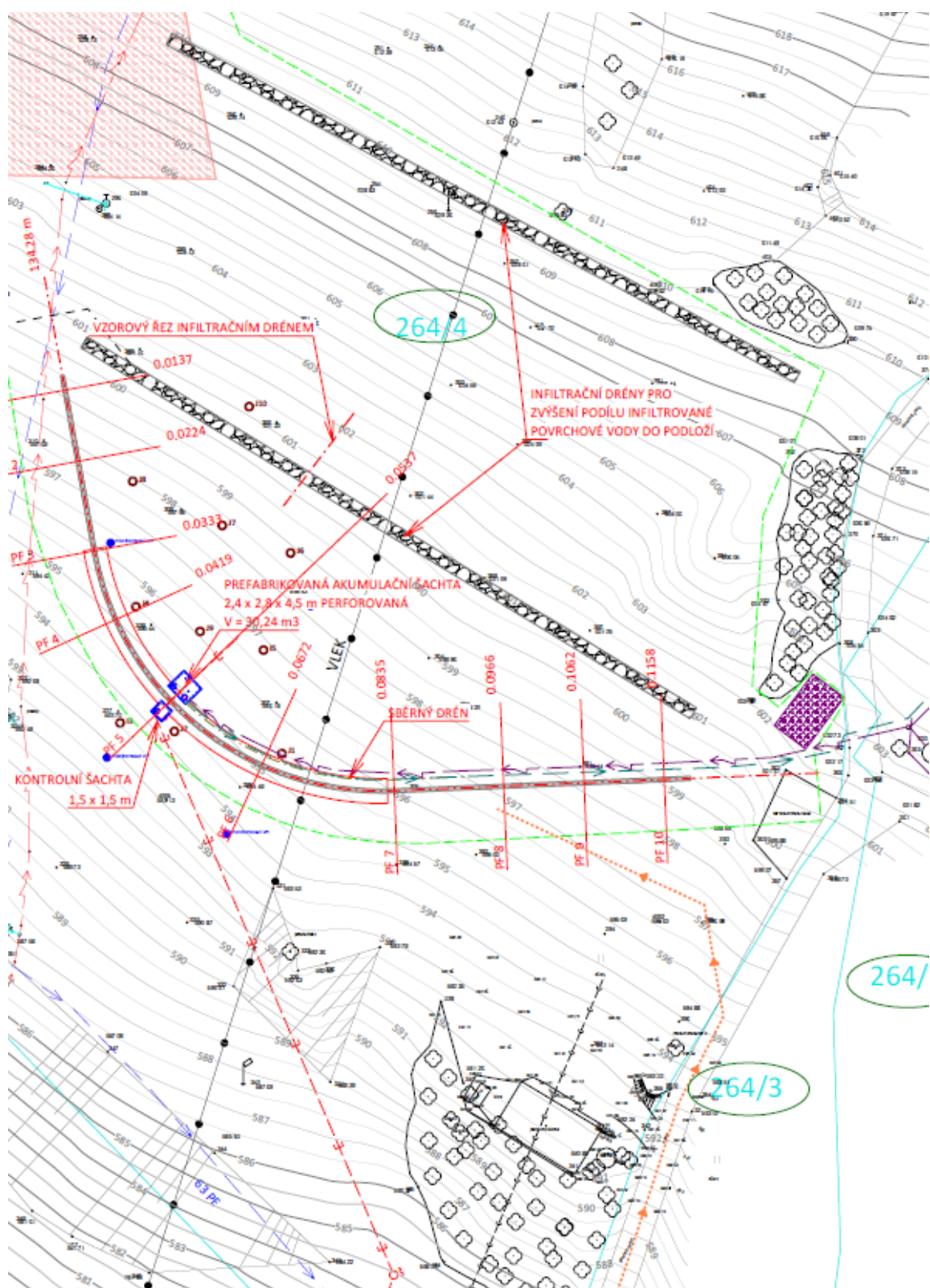
Príloha 3a.: Odberné miesta archívnych chemických analýz povrchových tokov.

Označenie odberu	SB015	SB016	SB017	SB018
Dátum odberu	10.8.2009	10.8.2009	10.8.2009	10.8.2009
Nadmorská výška (m)	561	432	524	482
pH	6,93	8,03	7,12	6,93
vodivosť ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	93	553	103	76
prietok (% dlhodobého roč. priemeru)	117	117	117	117
hlásný profil ČHMÚ	Trmice	Trmice	Trmice	Trmice
SiO ₂ (mg/l)	18,9	19,8	16,2	12,2
Al ($\mu\text{g}/\text{l}$)	31	51	34	110
Na (mg/l)	4,22	55,15	4,48	3,16
K (mg/l)	0,89	4,63	1,01	0,85
Mg (mg/l)	2,83	11,4	3,11	2,12
Ca (mg/l)	7,43	34,74	8,66	6,49
Li ($\mu\text{g}/\text{l}$)	6	19	10,8	8,9
Sr ($\mu\text{g}/\text{l}$)	< 0,05	0,14	< 0,05	< 0,05
Fe ($\mu\text{g}/\text{l}$)	< 0,05	0,06	0,05	0,21
Mn ($\mu\text{g}/\text{l}$)	< 5,00	< 5,00	< 5,00	12
Zn ($\mu\text{g}/\text{l}$)	23	< 5,00	< 5,00	18
Be ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0,03	< 0,02	0,05	0,14
Cd ($\mu\text{g}/\text{l}$)	1,25	< 0,04	0,34	0,51
As ($\mu\text{g}/\text{l}$)	4,7	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Pb ($\mu\text{g}/\text{l}$)	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40
Cu ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0,6	0,9	1,4	0,6
Cl (mg/l)	1,2	84,4	1,3	1,4
NO ₃ (mg/l)	2,7	5,3	3,3	3,6
SO ₄ (mg/l)	23,5	35,8	22,8	21,4
F (mg/l)	0,09	0,23	0,13	0,14
UVA (1/cm)	0,04	0,06	0,05	0,19

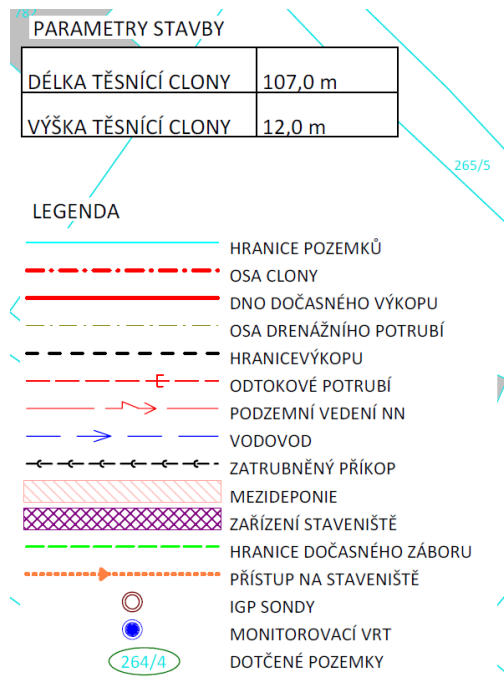
Príloha 3b.: Odberné miesta archívnych chemických analýz povrchových tokov v oblasti okolo záujmového miesta a ich výsledky v tabuľke.



Príloha 4.: Situácia prieskumných vrtov J1 až J10 (zelené body) a monitorovacích vrtov M1 až M4 (modré body).

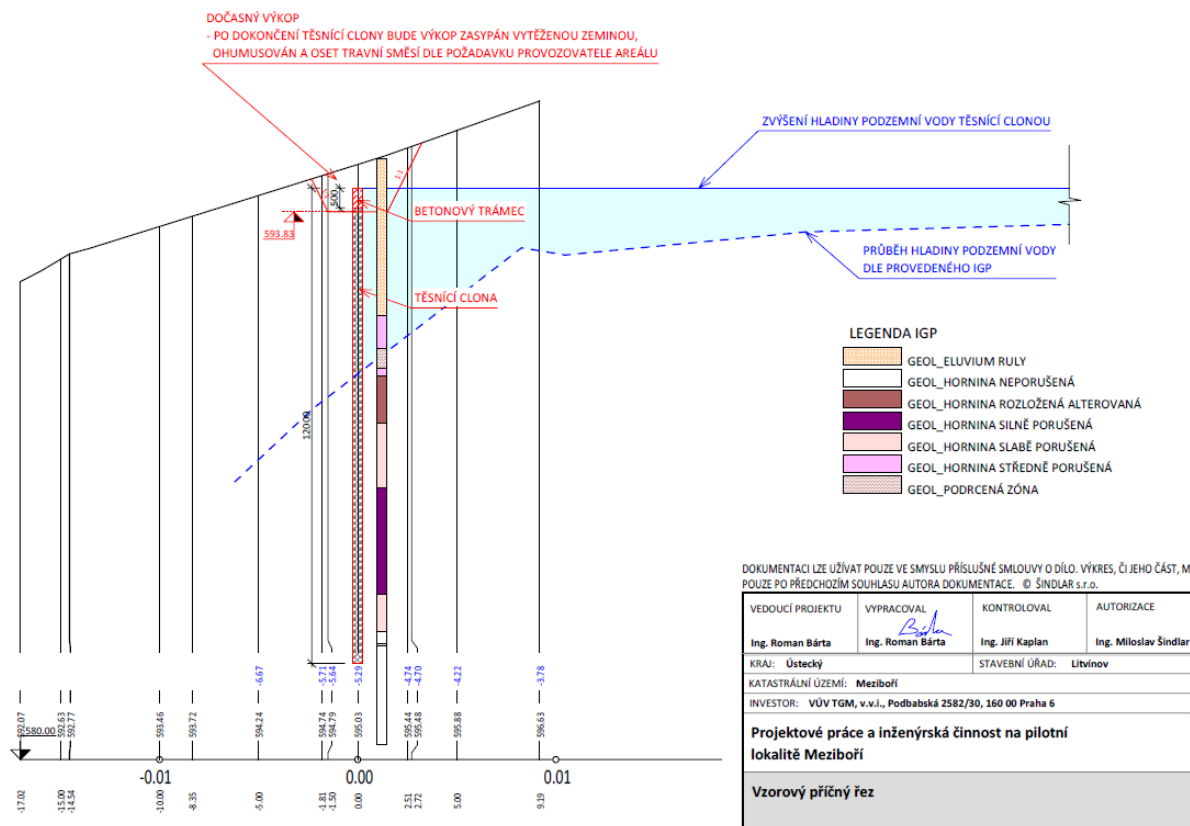


Príloha 5.: Koordinačná situácia podzemnej hrádze na lokalite s pridanými prvkami podľa najnovšieho technického projektu.

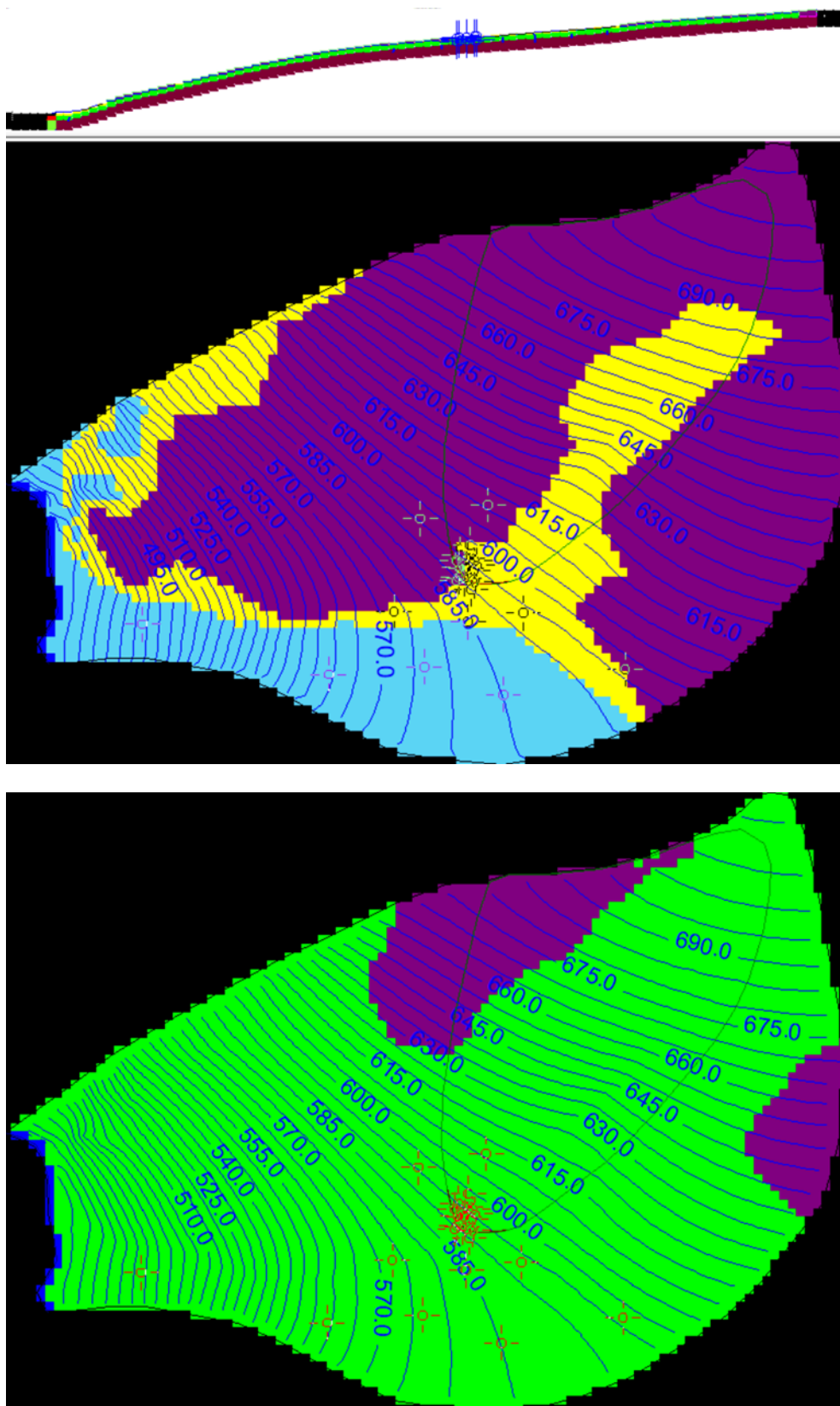


Príloha 6.: Legenda ku koordinačnej situácii najnovšieho technického projektu.

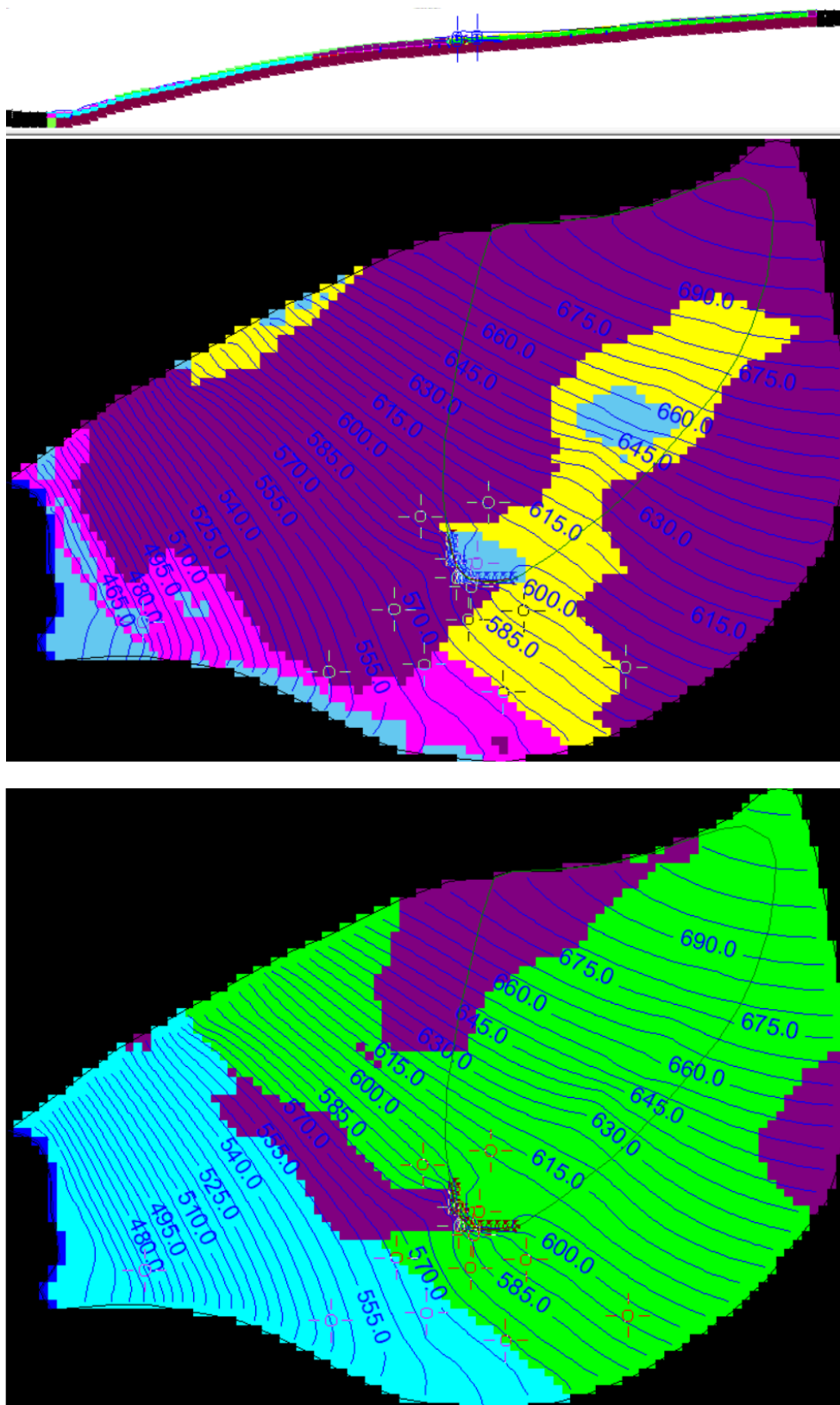
PF 4 KM 0.0300
VZOROVÝ PŘÍČNÝ ŘEZ
M 1 : 200/100



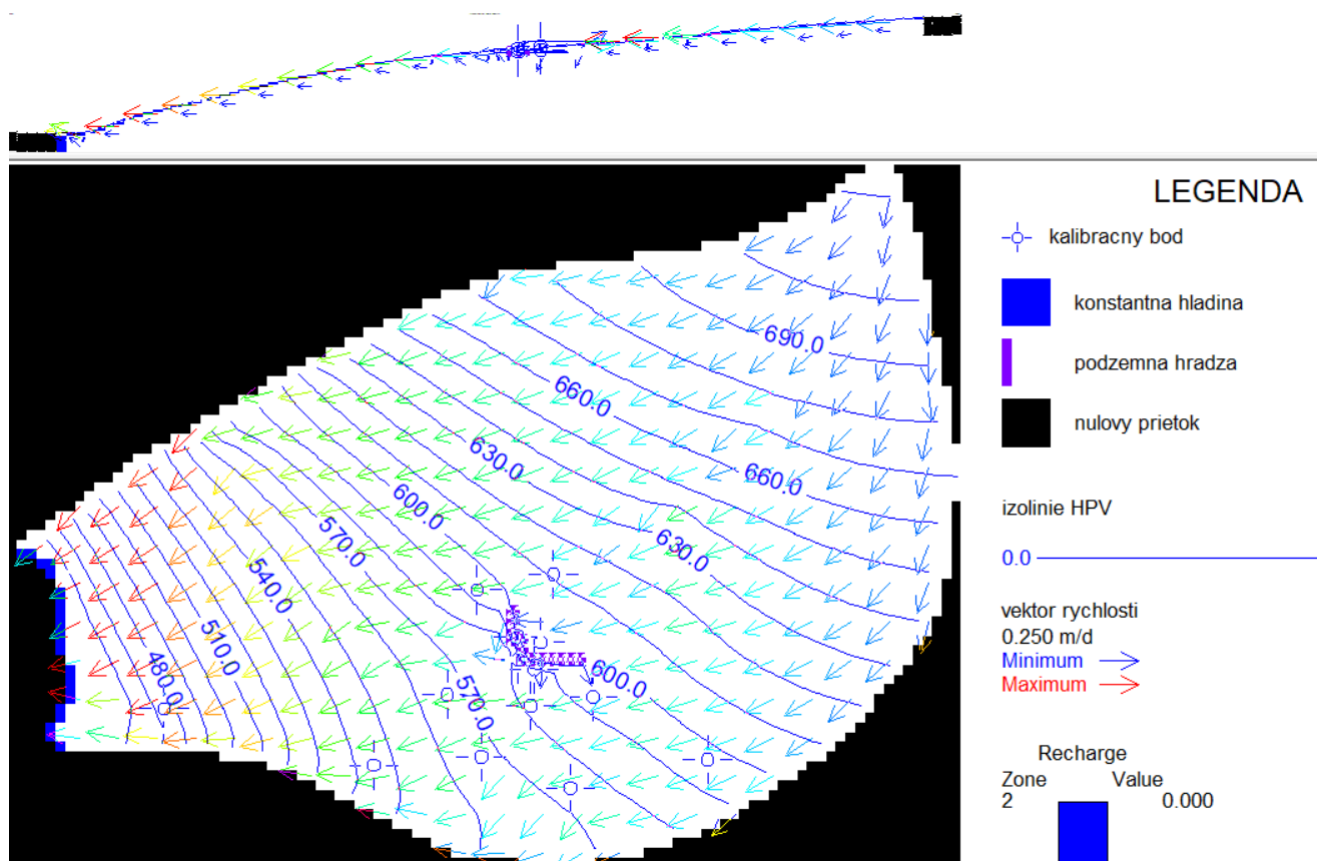
Príloha 7.: Vzorový priečný rez svahom cez teleso hrádze.



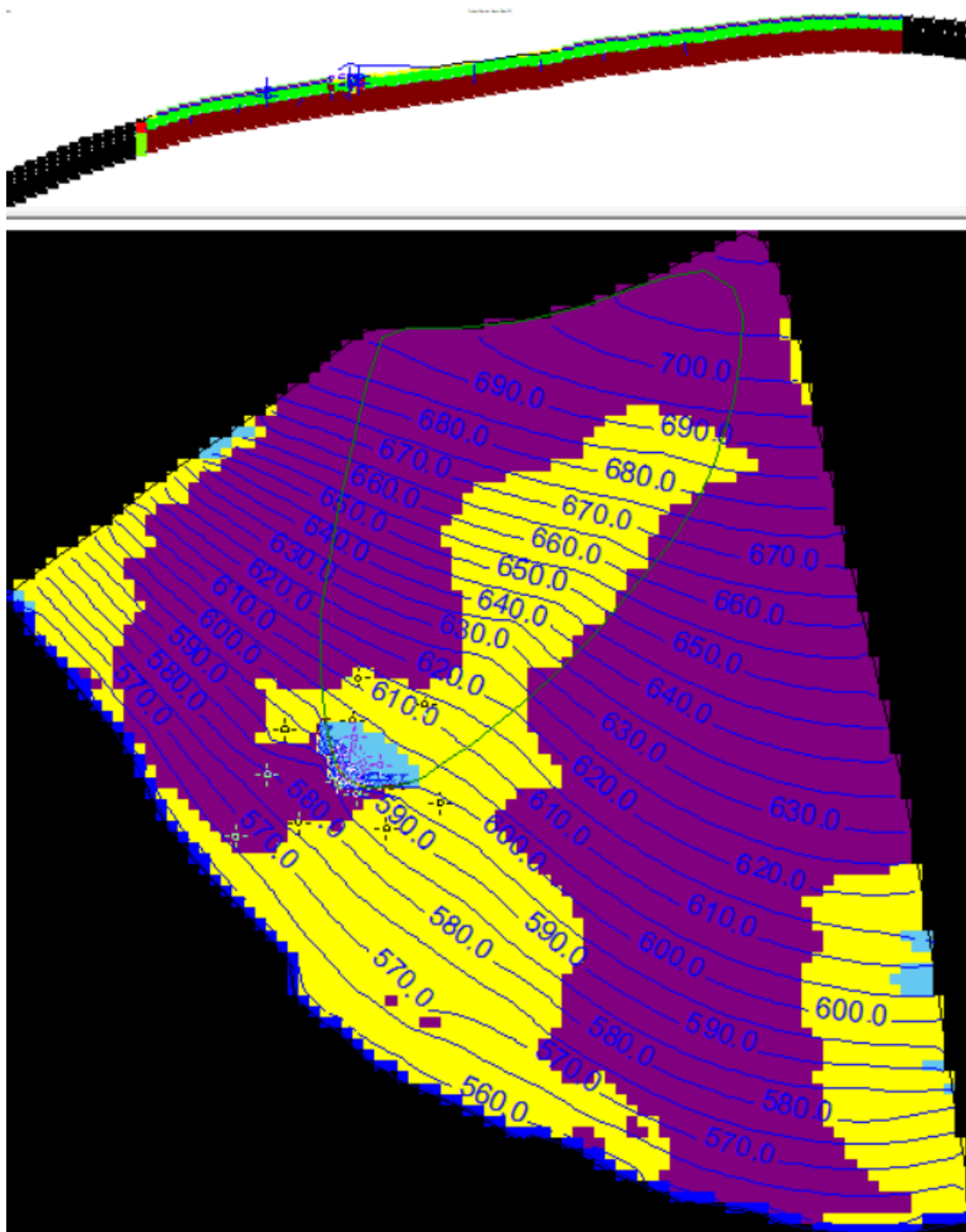
Príloha 8.: Izolínie podzemnej vody v prvom riešení bez drenážnej oblasti so zaplavenou plochou na povrchu – modré miesta (vyššie) a situácia v 2. vrstve (nižšie) - fialové miesta predstavujú vyschnuté časti danej vrstvy. To isté platí aj pre nasledujúce mapy.



Príloha 9.: Izolínie podzemnej vody v prvom riešení s drenážnou oblasťou po pridaní podzemnej hrádze (obr. vyššie prvá vrstva so zaplavenými oblasťami nad hrádzou - modrá, obr. nižšie potom s miestami, kde zamýšľaný kolektor vyschol - fialová).



Príloha 10.: Mapa vektorov rýchlosti (smerov prúdenia) v druhej variante s hrádzou na škále od tmavomodrej (0,01 m/deň), k červenej (0,25 m/deň).

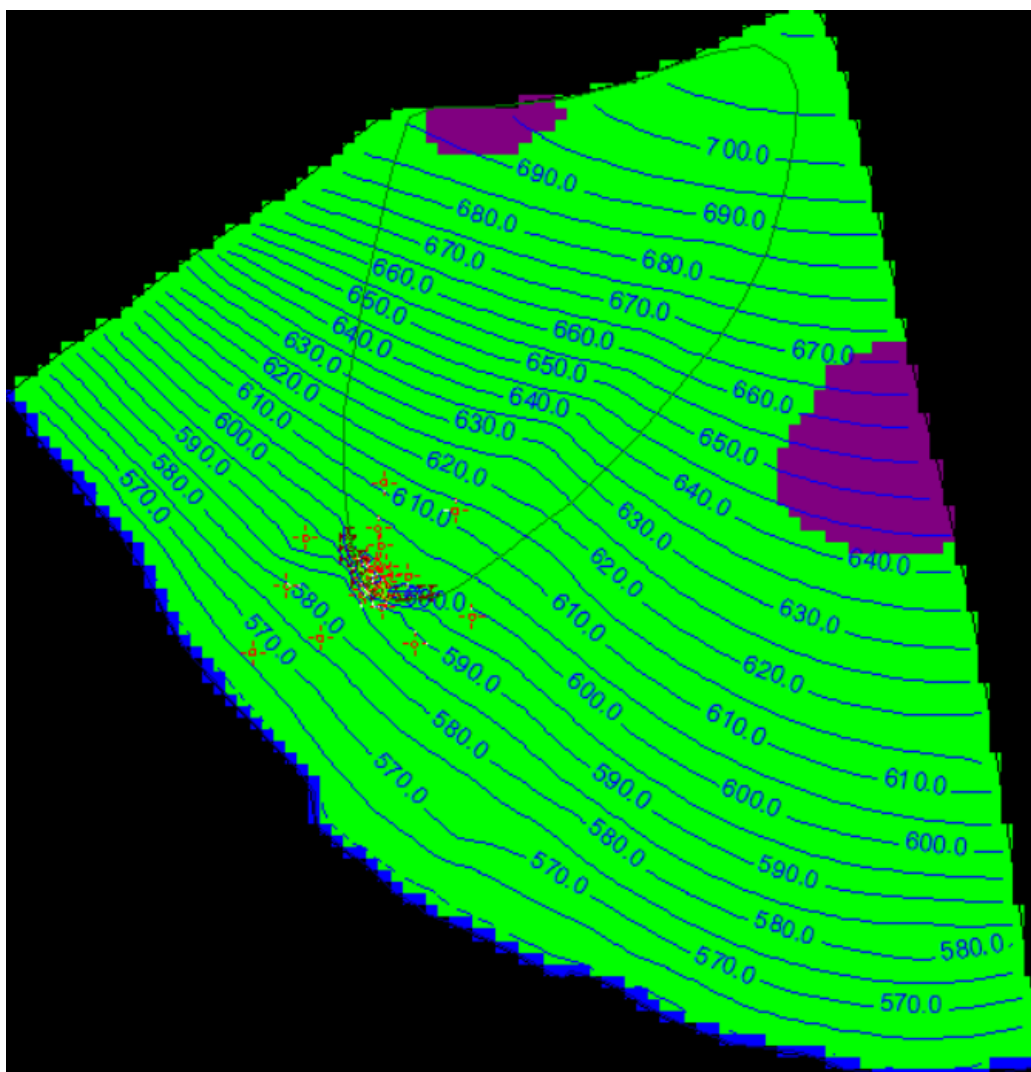


Príloha 11.: Mapa izolínií podzemnej vody v druhej variante po pridaní hrádze, podľa nového technického projektu (situácia v 1. vrstve).

fialová – hladina pod úrovňou 1. vrstvy,

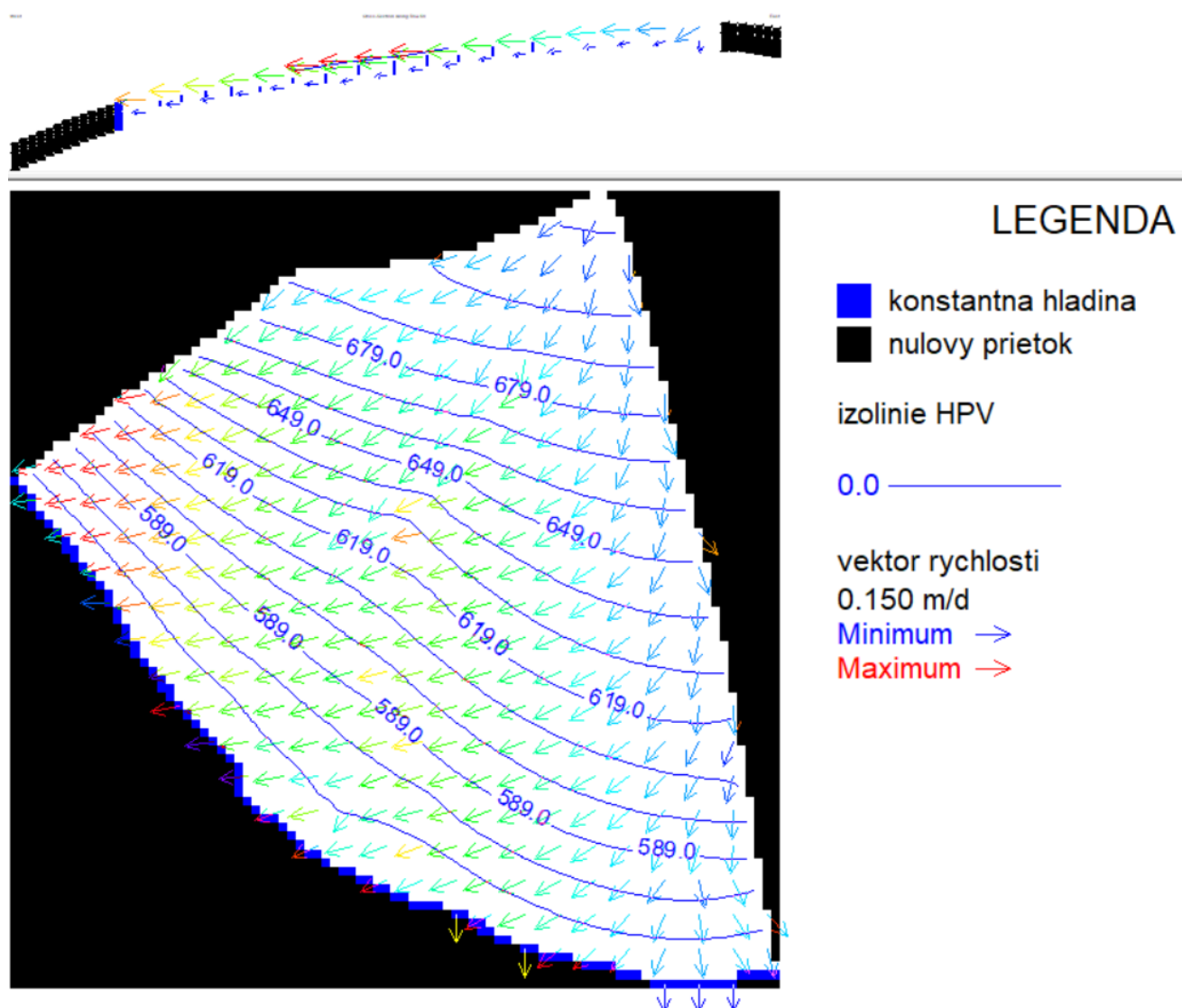
modrá – zaplavená oblasť,

žltá – voľná hladina v 1. vrstve

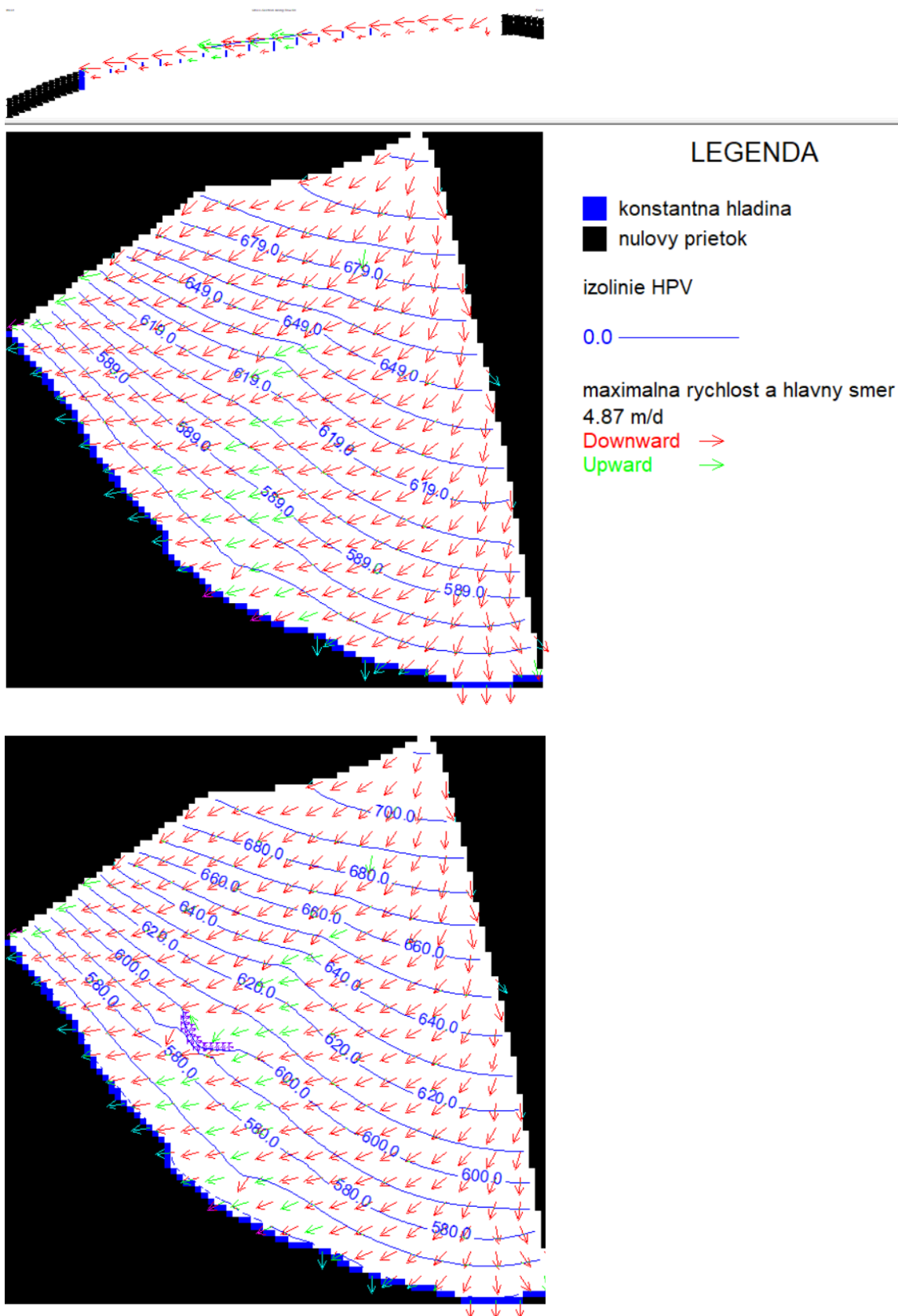


Príloha 12.: Mapa izolínií podzemnej vody v druhej variante po pridání hrádze, podľa nového technického projektu (situácia v 2. vrstve).

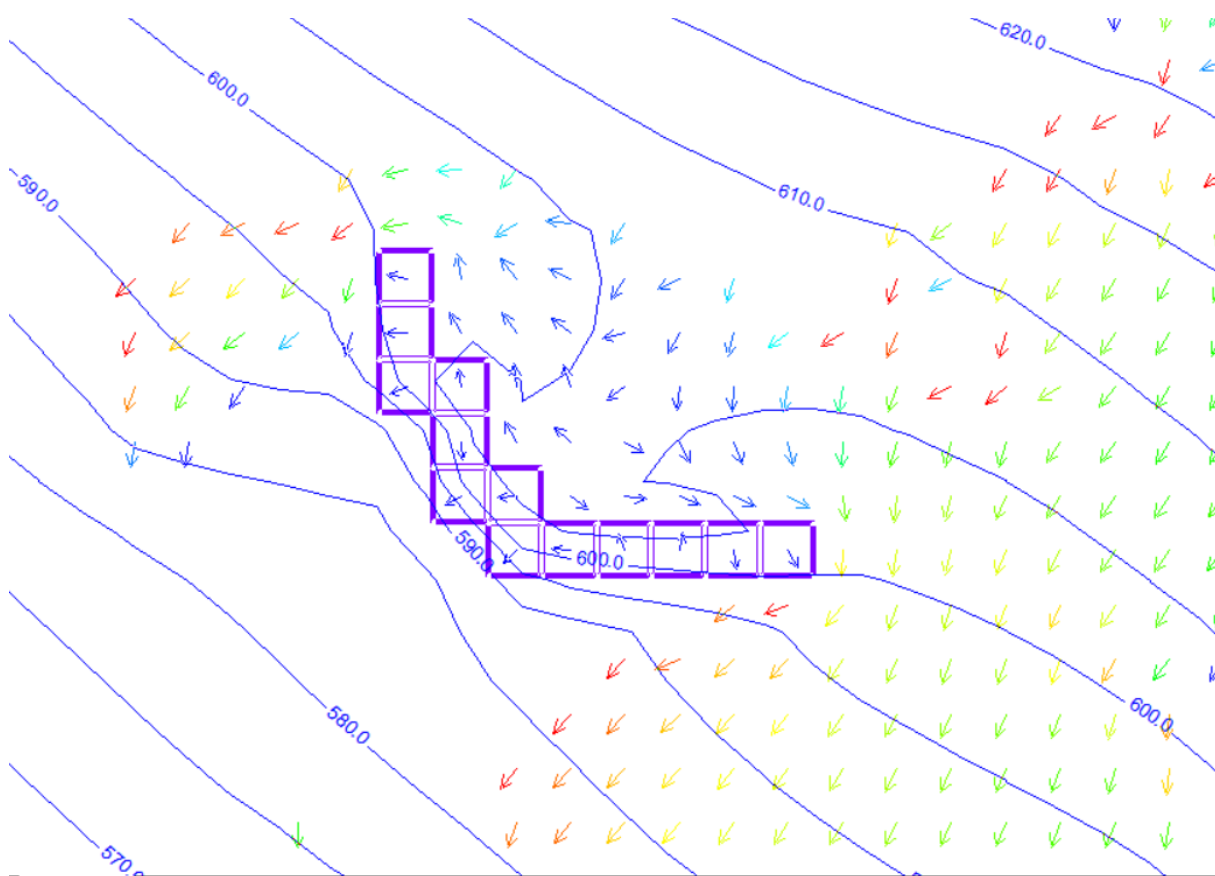
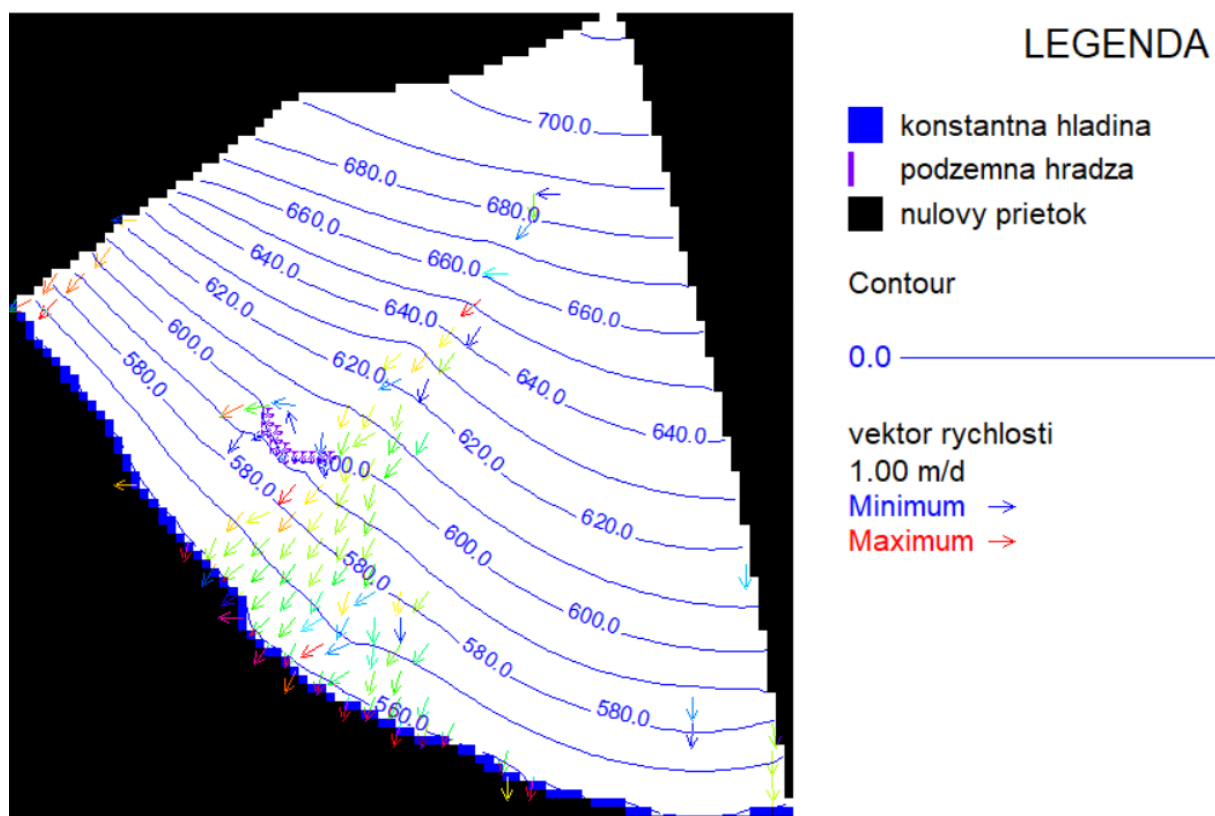
fialová – hladina pod úrovňou 2. vrstvy (kolektoru)



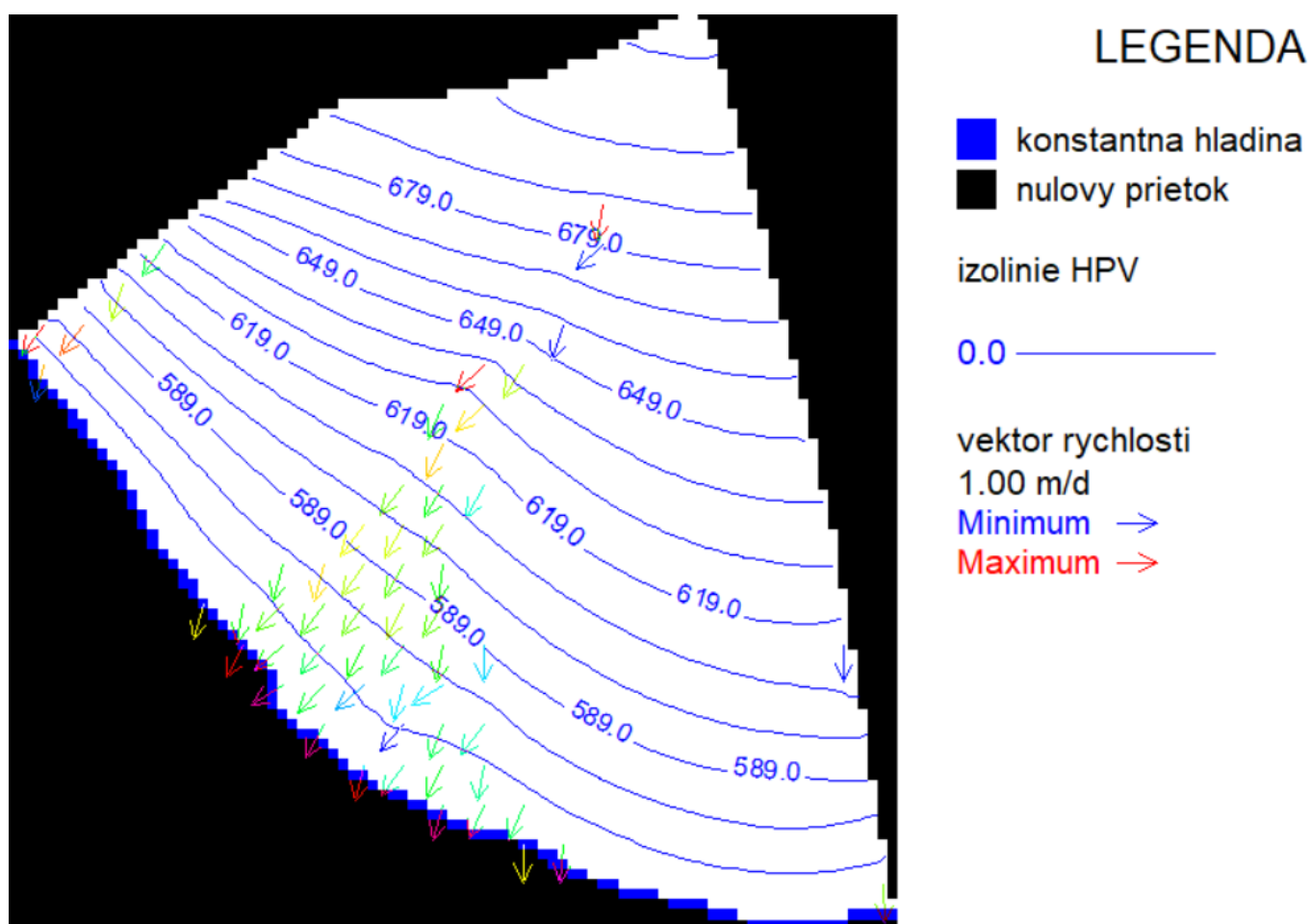
Príloha 13.: Mapa vektorov rýchlosti (smerov prúdenia) v druhej variante za prirodzeného ustáleného stavu na škále od tmavomodrej (0,01 m/deň), k červenej (0,15 m/deň).



Príloha 14.: Hlavné smery prúdenia v druhej vrstve (2. varianta), kde zelenými šípkami je znázornené prúdenie cez hranicu z 2. vrstvy do 1. a červenými potom prúdenie iba vo vrstve 2. Obrázok vyššie - prirodzený stav, obrázok nižšie - stav po pridaní hrádze.



Príloha 15.: Znázornenie prúdenia v prvej modelovej vrstve (2. varianta) po pridaní hradze vo väčšej a menšej mierke. Farebná škála od tmavomodrej (0,01 m/deň) po červenú (1 m/deň).



Príloha 16.: Znázornenie prúdenia v prvej modelovej vrstve (2. varianta) bez hrádze. Farebná škála od tmavomodrej (0,01 m/deň) po červenú (1 m/deň).